

VISIT...

LANZAROTE  
*Caliente*.COM

|                |   |
|----------------|---|
| Введение ..... | 3 |
|----------------|---|

## Раздел I. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 1. Основные понятия и положения</b> .....                                       | 5   |
| 1.1. Основные термины и определения .....                                                | 5   |
| 1.2. Единицы измерения давления .....                                                    | 9   |
| 1.3. Методы и средства измерения давления .....                                          | 13  |
| <b>Глава 2. Жидкостные манометры</b> .....                                               | 16  |
| 2.1. Основные типы жидкостных манометров и принципы их действия ..                       | 17  |
| 2.2. Поправки к показаниям и погрешности жидкостных манометров ..                        | 22  |
| 2.3. Конструктивные особенности жидкостных манометров .....                              | 29  |
| 2.4. Жидкостно-поршневые манометры .....                                                 | 35  |
| 2.5. Перспективы развития жидкостных манометров .....                                    | 38  |
| <b>Глава 3. Поршневые манометры</b> .....                                                | 41  |
| 3.1. Принцип действия, основы теории и типы поршневых манометров ..                      | 42  |
| 3.2. Поправки и погрешности поршневых манометров .....                                   | 50  |
| 3.3. Конструктивные особенности поршневых манометров .....                               | 56  |
| 3.4. Поршневые автоматизированные задатчики давления .....                               | 69  |
| 3.5. Перспективы развития поршневых манометров .....                                     | 74  |
| <b>Глава 4. Деформационные манометры</b> .....                                           | 76  |
| 4.1. Основные принципы преобразования давления деформационным манометром .....           | 77  |
| 4.2. Упругие чувствительные элементы деформационных манометров (УЧЭ) .....               | 79  |
| 4.3. Манометры со свободным перемещением (УЧЭ) .....                                     | 86  |
| 4.4. Резистивные деформационные манометры .....                                          | 96  |
| 4.5. Манометры с силовой компенсацией .....                                              | 108 |
| 4.6. Перспективы развития деформационных манометров .....                                | 113 |
| <b>Глава 5. Методы косвенных измерений давления</b> .....                                | 115 |
| 5.1. Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа .....           | 116 |
| 5.2. Косвенные методы, основанные на фазовых переходах .....                             | 120 |
| 5.3. Косвенные методы, основанные на изменении физических свойств измеряемой среды ..... | 123 |

## Раздел II. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗОВ И ПАРОВ

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 6. Основные понятия и положения</b> .....                                          | 125 |
| 6.1. Агрегатные состояния вещества .....                                                    | 125 |
| 6.2. Поток жидкости. Основные характеристики потока .....                                   | 126 |
| 6.3. Расход жидкости. Основные понятия .....                                                | 131 |
| 6.4. Расходомеры. Общая классификация. Перспективы развития .....                           | 132 |
| <b>Глава 7. Техника измерения расхода</b> .....                                             | 134 |
| 7.1. Расходомеры переменного перепада давления. Принцип действия. Уравнения измерений ..... | 134 |
| 7.2. Расходомеры постоянного перепада давления .....                                        | 146 |
| 7.3. Турбинные расходомеры .....                                                            | 155 |
| 7.4. Электромагнитные расходомеры .....                                                     | 159 |
| 7.5. Ультразвуковые расходомеры .....                                                       | 162 |
| 7.6. Оптические (лазерные) расходомеры .....                                                | 165 |
| 7.7. Измерение расхода методом контрольных „меток” .....                                    | 167 |

|                                                                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.8. Расходомеры, основанные на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР-расходомеры)                          | 168        |
| 7.9. Центробежные расходомеры                                                                                    | 170        |
| 7.10. Вихревые и гидродинамические расходомеры                                                                   | 172        |
| 7.11. Приборы для измерения расхода в единицах массы (массовые расходомеры)                                      | 174        |
| 7.12. Техника измерения расхода жидкостей и газов в трубопроводах больших диаметров                              | 182        |
| 7.13. Измерение расхода многофазных сред                                                                         | 188        |
| 7.14. Измерение переменных расходов                                                                              | 193        |
| <b>Глава 8. Средства и методы градуировки и поверки расходоизмерительных систем</b>                              | <b>198</b> |
| 8.1. Образцовые расходомерные установки. Принцип действия, конструктивные и метрологические особенности          | 198        |
| 8.2. Основы метрологической аттестации образцовых расходомерных установок                                        | 213        |
| 8.3. Основы градуировки и поверки расходомеров                                                                   | 215        |
| <b>Раздел III. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ</b>                                                        |            |
| <b>Глава 9. Счетчики количества жидкостей</b>                                                                    | <b>218</b> |
| 9.1. Основные характеристики счетчиков                                                                           | 218        |
| 9.2. Скоростные счетчики                                                                                         | 219        |
| 9.3. Объемные счетчики                                                                                           | 224        |
| 9.4. Барабанные и весовые счетчики                                                                               | 239        |
| <b>Глава 10. Средства и методы поверки счетчиков количества жидкостей</b>                                        | <b>240</b> |
| 10.1. Испытательные установки для поверки счетчиков количества жидкостей                                         | 240        |
| 10.2. Поверка испытательных установок для счетчиков количества жидкостей                                         | 247        |
| 10.3. Основы поверки счетчиков количества жидкостей                                                              | 249        |
| <b>Глава 11. Счетчики количества газов</b>                                                                       | <b>253</b> |
| 11.1. Счетчики ротационные                                                                                       | 253        |
| 11.2. Газосчетчики с измерительными мехами и барабанные газосчетчики                                             | 254        |
| <b>Глава 12. Средства и методы поверки счетчиков количества газов</b>                                            | <b>256</b> |
| 12.1. Принцип действия и основные конструктивные элементы испытательных установок для счетчиков количества газов | 256        |
| 12.2. Поверка испытательных установок для газосчетчиков                                                          | 261        |
| 12.3. Основы поверки газосчетчиков                                                                               | 262        |
| <b>Раздел IV. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ</b>                                                                     |            |
| <b>Глава 13. Методы и средства измерения уровня жидкостей</b>                                                    | <b>265</b> |
| 13.1. Основные понятия и положения                                                                               | 265        |
| 13.2. Механические уровнемеры                                                                                    | 268        |
| 13.3. Акустические уровнемеры                                                                                    | 271        |
| 13.4. Электрические уровнемеры                                                                                   | 275        |
| 13.5. Оптические уровнемеры                                                                                      | 277        |
| 13.6. Тепловые уровнемеры                                                                                        | 278        |
| 13.7. Образцовые уровнемерные установки                                                                          | 280        |
| 13.8. Принципы метрологической аттестации образцовых уровнемерных установок                                      | 283        |
| <b>Список рекомендуемой литературы</b>                                                                           | <b>285</b> |

Почти 70 % всех измерений, выполняемых в науке, промышленности и сельском хозяйстве, связаны с измерениями давления, расхода, количества и уровня веществ.

Давление и расход являются основными рабочими параметрами, точность и надежность измерения которых определяет ценность результатов экспериментальных исследований в гидро- и газодинамике; качество технологических процессов в химической, пищевой и бумажной промышленности; оптимальные режимы работы объектов в ракетной технике и авиации, энергетике и транспорте; эффективность систем добычи и переработки нефти и нефтепродуктов.

Точные измерения количества и уровня веществ лежат в основе учета и планирования продукции, определяют рациональные режимы транспортирования и распределения нефти и нефтепродуктов, необходимы для дальнейшего развития химической и топливной промышленности.

Разнообразие требований к технике измерений давления, расхода, количества и уровня веществ, обусловленное спецификой научного поиска и производства в различных отраслях народного хозяйства, различные физико-химические свойства измеряемых средств способствовали появлению, разработке и внедрению в практику множества различных методов и средств измерений этих величин. Пожалуй, ни в каких других областях измерений нет такого обилия научных идей и технических решений, как в областях измерений давления, расхода, количества и уровня. Почти все физические явления и закономерности, открытые давно или недавно, воплощаются в современной технике измерения этих величин.

Понять физические принципы измерений, научиться распознавать причины и источники возможных погрешностей измерений, а следовательно, научиться грамотно измерять и проводить метрологическое обслуживание средств измерений — такова основная задача тех, для кого предназначено это учебное пособие. Поэтому в нем основное внимание уделено физическим явлениям, лежащим в основе методов измерений; оценке методических погрешностей и обоснованию предпочтительных областей и условий применения тех или иных измерительных устройств. Кроме того, достаточно широко освещены вопросы метрологического обслуживания этих измерительных устройств. Это связано с тем, что на сегодняшний день, несмотря на ряд успешно проведенных работ, эталонные и образцовые базы этих областей измерений (более или менее благополучно обстоят дела лишь в области измерения давления) все еще отстают от потребностей науки и производства и их совершенствование так же, как и совершенствование приемов и принципов метрологического обслуживания средств измерений является главной, первоочередной задачей метрологов любой квалификации, специализирующихся в этих областях измерений.



## ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

---

Измерение давления необходимо практически в любой области науки и техники как при изучении происходящих в природе физических процессов, так и для нормального функционирования технических устройств и технологических процессов, созданных человеком. Давление определяет состояние веществ в природе (твердое тело, жидкость, газ). Под его действием происходили глобальные процессы внутри Земли, в результате которых образовались водная и воздушная ее оболочки, твердая кора. Указанные процессы продолжают и в настоящее время. Так, под действием давления при извержении вулканов из недр Земли изливаются потоки расплавленной магмы, а в водную и воздушную оболочки поступают большие количества газообразных веществ. Перепады давления в атмосфере приводят в движение огромные массы воздуха, воздействуя тем самым на формирование погоды и на процессы взаимодействия, происходящие в атмосфере и мировом океане.

Чрезвычайно многообразно применение давления в науке, технике и производстве. Энергетические возможности тепло- и гидроэлектростанций и атомных электростанций определяются давлением пара или воды на лопости турбин, под действием давления по каналам и трубопроводам на тысячи километров транспортируется вода, нефть и газ. Давление приводит в движение автомобили и самолеты, геодезические ракеты и космические корабли, открывает и закрывает двери лифта, вагонов метропоездов, троллейбусов и автобусов, подает воду и газ в квартиры наших домов.

Посредством давления осуществляется работа разнообразных станков, механизмов и установок в различных отраслях производства. Например, в крупнейшем в Европе советском штамповочном прессе, установленном в г. Исуар (Франция), давление создает гигантское усилие в  $6,5 \cdot 10^8$  Н (около 6500 тонны-силы); давление заставляет со скоростью 60 м/ч „шагать” самый большой в Европе экскаватор ЭШ-100.100 высотой 25-этажного здания, вес которого превосходит вес знаменитой Эйфелевой башни в Париже (более 10000 т).

По давлению контролируют состояние рабочих сред в различных технологических процессах нефтехимической промышленности, при производстве искусственных волокон и пр. Во многих отраслях науки при проведении физических, термодинамических и метрологических исследований (определение концентрации газов в твердых веществах, констант уравнений состояния различных веществ, эталонные температурные и линейные измерения) также требуется измерять давление.

Измерение давления и его контроль необходимы не только в науке и технике, но и в практической медицине. Диагностика состояния здоро-

вья человека требует определения давления крови, спинномозговой и внутричерепной жидкости, давления внутри глаза. Кроме того, лечение ряда заболеваний и некоторые хирургические операции, проводят внутри барометрических камер при строго определенном давлении.

## Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

### 1.1. Основные термины и определения

Давление характеризует напряженное состояние жидкостей и газов в условиях всестороннего сжатия и определяется частным от деления нормальной к поверхности силы на площадь этой поверхности

$$p = \frac{N}{F}, \quad (1.1)$$

где  $p$  — давление;  $N$  — нормальная сила, действующая на поверхность;  $F$  — площадь поверхности.

При этом принимается, что нормальная сила равномерно распределена по поверхности, а в жидкости или газе отсутствуют касательные напряжения. Так как действующая сила всегда перпендикулярна к поверхности вне зависимости от ее расположения, то давление является скалярной величиной.

В общем случае при неравномерном распределении действующих на жидкость или газ внешних сил вводится понятие давление в точке:

$$p_* = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta F} \quad \text{при } \Delta F \rightarrow 0, \quad (1.2)$$

где  $\Delta N$  — нормальная сила, действующая на сколь угодно малую площадь  $\Delta F$ .

Понятие давления как физической величины во всех его проявлениях едино. Вместе с тем, во многих естественных природных явлениях и в различных технических устройствах и процессах определяющим является не само давление, а его значение относительно другого. Например, выброс лавы и газов при извержении вулкана происходят из-за того, что давление в его жерле больше, чем давление окружающего воздуха и сопротивление слагающих его твердых пород; под действием разности двух давлений по магистральным трубопроводам транспортируются нефть и газ из Сибири; действует знаменитый фонтан „Самсон” в Петергофе.

При сравнении значений двух давлений одно из них принимается за начало отсчета их разности. По этому признаку различают следующие виды давлений.

**Абсолютное давление** — давление, значение которого при измерении отсчитывается от давления, равного нулю. Абсолютное давление воздушной оболочки Земли на ее поверхность называется **атмосферным** давлением.

Давление, равное нулю, характеризует состояние жидкости или газа, обусловленное различными физическими причинами, при котором в них отсутствуют напряжения сжатия.

Давление газа равно нулю, если его концентрация настолько мала, что молекулы газа практически не взаимодействуют друг с другом, или если равна нулю абсолютная температура газа. Это состояние достигается, например, во внутренней полости гигантского тороидального кольца мощного синхрофазотрона. В естественных условиях указанное состояние — сверхглубокий вакуум — наблюдается в отдаленных областях космического пространства.

Равенство нулю давления жидкости имеет место, если отсутствуют действующие на нее внешние силы. Это наблюдается, например, для жидкости, находящейся в состоянии невесомости на борту орбитальной космической станции. В данном случае силы земного тяготения уравновешены центробежными силами, возникающими при равномерном движении станции по орбите. В нормальных земных условиях давление жидкости может быть равно нулю только в ее верхнем поверхностном слое.

Во всех других случаях измеряемое давление сравнивается с давлением, значение которого не равно нулю. Данные виды давления, в отличие от абсолютного давления, являются относительными. Здесь следует выделить разность давлений и избыточное давление.

Разность давлений — разность двух произвольных давлений, значение одного из которых принято за начало отсчета. В этом случае основное значение имеет разность давлений, а не абсолютные значения каждого из них.

Разность давлений

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (1.3)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — сравниваемые между собой абсолютные давления, причем  $p_2$  принято за начало отсчета. При  $p_1 > p_2$  разность давлений положительна, при  $p_1 < p_2$  — отрицательна.

Следует подчеркнуть, что понятие „разность давлений равна нулю” по определению не адекватно равенству нулю давлений  $p_1$  и  $p_2$ .

Избыточное давление — разность давлений, одно из которых, принятое за начало отсчета, является абсолютным давлением окружающей среды. В большинстве случаев абсолютное давление окружающей среды — это атмосферное давление в месте измерений.

Избыточное давление

$$p_{\text{и}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}}, \quad (1.4)$$

где  $p_{\text{абс}}$  — абсолютное давление;  $p_{\text{атм}}$  — атмосферное давление.

Так же, как и ранее, при  $p_{\text{абс}} > p_{\text{атм}}$  избыточное давление положительно, при  $p_{\text{абс}} < p_{\text{атм}}$  — отрицательно, а равенство нулю  $p_{\text{и}}$  не адекватно равенству нулю  $p_{\text{абс}}$  и  $p_{\text{атм}}$ . В этом заключается принципиальное различие между понятиями разность давлений, избыточное и абсолютное давление. Последнее по определению не может быть отрицательным.

Для газовых смесей применяется специальный термин — **парциальное давление** — абсолютное давление одного из компонентов газовой смеси. Под этим понимается абсолютное давление данного компонента при условии, что он займет весь объем, в котором находится газовая смесь.

Сумма парциальных давлений всех компонентов газовой смеси равна абсолютному давлению смеси газов, т. е.

$$p_{\text{абс}} = \sum_{i=1}^k p_{ni}, \quad (1.5)$$

где  $p_{\text{абс}}$  — абсолютное давление смеси газов;  $p_{ni}$  — парциальные давления каждого из компонентов смеси.

**Вакуум** — состояние среды, абсолютное давление которой существенно меньше атмосферного давления. Понятие „вакуум” часто отождествляют с понятием „низкое абсолютное давление”. Это недопустимо, так как давление является физической величиной, характеризующей количественно состояние среды.

Виды давления графически изображены на рис. 1. Нижняя горизонтальная линия с индексом „0” соответствует абсолютному давлению  $p_{\text{абс}} = 0$ , горизонтальная линия с индексом „Б” — атмосферному давлению ( $p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}}$ ). Горизонтальные штриховые линии выше и ниже линии Б ограничивают зону изменений атмосферного давления в месте измерений. Например, для Москвы зона изменений атмосферного давления составляет  $(995 \pm 40)$  гПа или  $(745 \pm 30)$  мм рт.ст., т. е. отклонения атмосферного давления от среднего значения не превышают  $\pm 4\%$ . Заштрихованными столбиками обозначены подлежащие измерению давления в соответствии с их видом.

Измерения абсолютного давления широко распространены в области вакуумной техники (от  $10^{-12}$  до  $10^3$  Па), в метеослужбе, геодезии и авиационной технике (от  $10^2$  до  $4 \cdot 10^5$  Па). Более высокие давления (до 1–10 МПа) измеряют при научных исследованиях, в том числе в термодинамике. Более высокие абсолютные давления измеряют крайне редко, так как в этих случаях их можно измерить более простыми методами измерения избыточного давления.

Пределы измерений избыточного давления на несколько порядков выше. В области микроманометрии диапазон измерений составляет от  $10^{-1}$  до  $4 \cdot 10^4$  Па, в области средних давлений — от  $4 \cdot 10^4$  Па до 250 МПа и в области высоких и сверхвысоких давлений — от 250 МПа до 10 ГПа. Наиболее широкое применение в науке и технике находит диапазон средних избыточных давлений, особенно давлений до 10–25 МПа.

Широкое применение в народном хозяйстве страны находят также измерения разности давлений, например, при определении расхода, уровня и плотности жидкостей и газов. Пределы измерений разности давлений составляет от 1 Па до 1 МПа, а в некоторых случаях до 10 МПа и выше.

С учетом специфики каждого из видов давления при измерениях применяются специальные средства измерений — манометры и измерительные преобразователи давления.

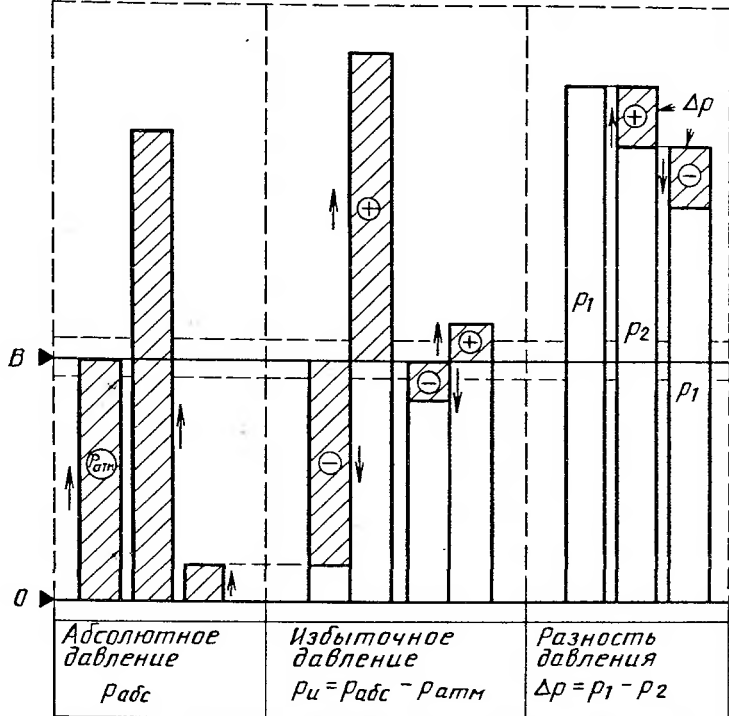


Рис. 1. Виды давлений

**Манометр** — измерительный прибор или измерительная установка для измерения давления или разности давлений с непосредственным отсчетом их значения.

**Измерительный преобразователь давления (датчик)** — первичный преобразователь, выходной сигнал которого функционально связан с измеряемым давлением или разностью давлений. Выходной сигнал датчика вторичными приборами преобразуется в показания значения давления или поступает в различные системы управления и регулирования.

В соответствии с видами измеряемого давления применяют следующие виды средств измерения давления: **манометр абсолютного давления** — манометр для измерения абсолютного давления; **барометр** — манометр для измерения атмосферного давления; **манометр избыточного давления** — манометр для измерения положительного избыточного давления, **вакуумметр\*** — манометр для измерения отрицательного избыточ-

\* Вакуумметрами часто называют манометры, предназначенные для измерения низких абсолютных давлений, существенно меньших, чем атмосферное давление (в вакуумной технике).

ного давления; **мановакуумметр** — манометр для измерения как положительного, так и отрицательного избыточного давления; **дифференциальный манометр** (дифманометр) — манометр для измерения разности двух давлений, каждое из которых отличается от атмосферного давления; **микроманометр** — дифференциальный манометр для измерения малых разностей двух давлений, каждое из которых существенно больше их разности.

## 1.2. Единицы измерения давления

Когерентной единицей Международной системы единиц (СИ) является паскаль (Па). По определению (1.1) единица давления паскаль представляет собой отношение единицы силы Ньютона к единице площади квадратному метру:  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ кг/(м}\cdot\text{с}^2)$ .

Размер единицы давления Па очень мал, его значение соответствует давлению столба воды высотой 0,1 мм. Поэтому на практике применяются единицы давления, кратные 1 Па, которые образуются добавлением к наименованию паскаль приставок, узаконенных СИ: килопаскаль (кПа), мегапаскаль (МПа) и гигапаскаль (ГПа). Численно указанные единицы давления  $1 \text{ кПа} = 1 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ;  $1 \text{ МПа} = 1 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ;  $1 \text{ ГПа} = 1 \cdot 10^9 \text{ Па}$ .

В технически обоснованных случаях допускается также применение других кратных единиц, которые образованы добавлением приставок, предусмотренных СИ: декапаскаль (даПа) и гектопаскаль (гПа). Соответственно:  $1 \text{ даПа} = 10 \text{ Па}$ ,  $1 \text{ гПа} = 1 \cdot 10^2 \text{ Па}$ .

Наряду с единицами давления СИ во многих отраслях народного хозяйства нашей страны, а также в зарубежных странах в настоящее время применяются единицы давления, которые должны быть изъяты по мере перехода на СИ.

Наиболее близка к СИ единица давления бар (бар), размер которой очень удобен для практики ( $1 \text{ бар} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ). Широко применяются также дольные и кратные значения этой единицы — миллибар (мбар) и килобар (кбар):  $1 \text{ мбар} = 1 \cdot 10^2 \text{ Па}$ ,  $1 \text{ кбар} = 1 \cdot 10^8 \text{ Па}$ .

В области измерения малых и средних давлений широкое распространение получили единицы давления килограмм-сила на квадратный сантиметр ( $\text{кгс/см}^2$ ) и килограмм-сила на квадратный метр ( $\text{кгс/м}^2$ ). Размеры указанных единиц давления:  $1 \text{ кгс/см}^2 = 0,980665 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $1 \text{ кгс/м}^2 = 9,80665 \text{ Па}$ .

Числовые значения этих единиц рассчитывают следующим образом. В системе МКГСС в отличие от СИ основной единицей является не единица массы (кг), а единица силы (кгс), которая равна силе, испытываемой массой 1 кг при нормальном ускорении свободного падения  $g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2$ . Отсюда, принимая во внимание, что сила равна произведению массы на ускорение, размеры единиц  $\text{кгс/см}^2$  и  $\text{кгс/м}^2$  принимают указанные выше значения.

В применяемых до настоящего времени жидкостных манометрах мерой измеряемого давления является высота столба жидкости. Поэтому

естественно применение единиц давления, определяемых высотой столба жидкости, т. е. основанных на единицах длины. В странах с метрическими системами мер получили распространение единицы давления миллиметр и метр водяного столба (мм вод. ст. и м вод. ст.) и миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.), а в странах с дюймовыми системами — дюйм и фут водяного столба (in H<sub>2</sub>O и ft H<sub>2</sub>O), дюйм ртутного столба (in Hg).

Размеры этих единиц давления пересчитываются в единицы СИ на основании формулы

$$p = H \cdot \rho \cdot g, \quad (1.6)$$

где  $H$  — высота столба жидкости, м,  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>,  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Размеры единиц регламентированы условиями:

плотность воды соответствует температуре  $t = 4^\circ\text{C}$  и равна  $\rho_{\text{в}} = 1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

плотность ртути соответствует температуре  $t = 0^\circ\text{C}$  и равна  $\rho_{\text{рт}} = 13595,1$  кг/м<sup>3</sup>;

ускорение свободного падения равно нормальному  $g_{\text{н}} = 9,80665$  м/с<sup>2</sup>.

Расчет по формуле (1.6) дает следующие значения размеров единиц: 1 мм вод.ст. = 9,80665 Па; 1 мм рт.ст. = 133,322 Па; 1 in H<sub>2</sub>O = 249,089 Па; 1 in Hg = 3386,39 Па.

Применяемая в странах Западной Европы единица давления торр практически равна мм рт.ст.: 1 торр = 1 атм/760 = 133,322 Па.

В англоязычных странах широко распространена также единица давления фунт-сила на квадратный дюйм (psi), размер которой равен 1 psi = 1 lbf/in<sup>2</sup> = 6,89476 · 10<sup>3</sup> Па.

Соотношения наиболее распространенных в нашей стране единиц давления приведены в табл. 1.

Пользуясь данными таблицы, можно легко пересчитать результаты измерений. Например, если при измерении атмосферного давления показания барометра дают  $p_{\text{атм}} = 737,2$  мм рт.ст., то при пересчете на Па получим  $p_{\text{атм}} = 98,285$  кПа.

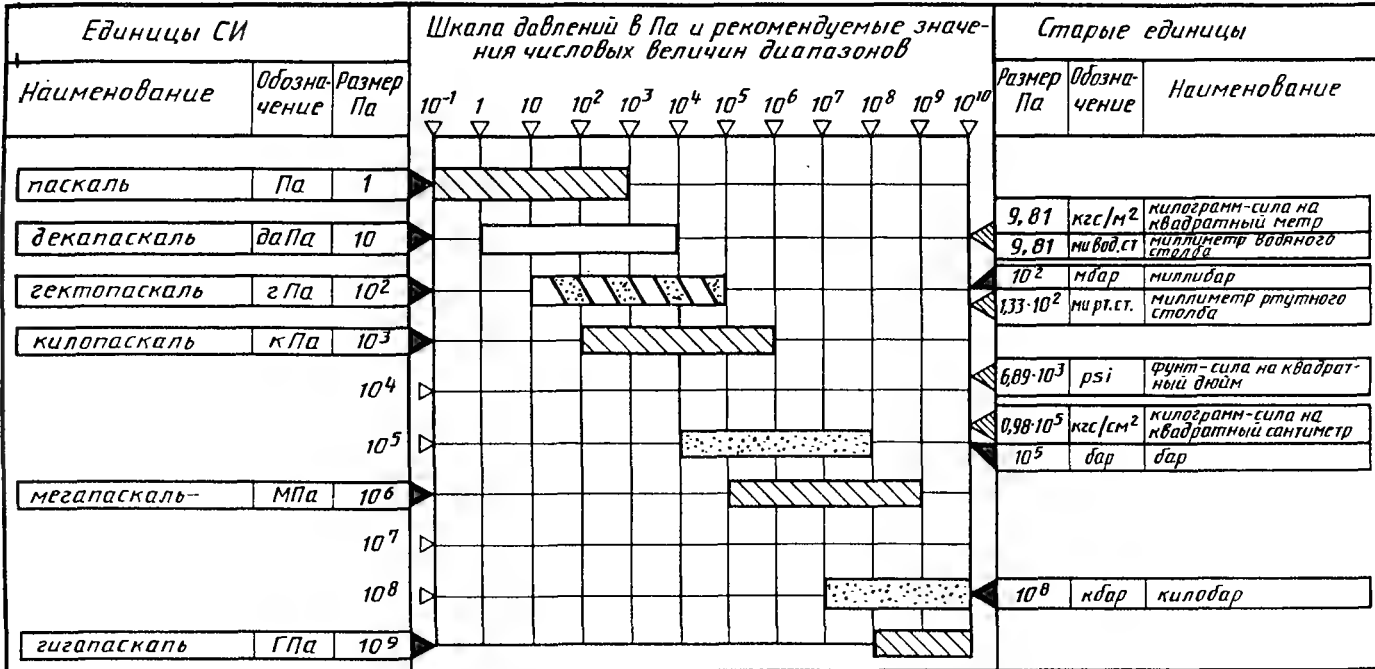
Диапазоны измерения давления (рис. 2), в которых применяется одна и та же единица давления, рекомендуется выбирать так, чтобы числовое значение давления находилось в диапазоне 0,1–1000. Размеры узаконенных СИ единиц давления (Па, кПа, МПа, ГПа) последовательно увеличиваются в 10<sup>3</sup> раз. Поэтому диапазоны их применения взаимно перекрываются (см. рис. 2), что позволяет проводить измерения во всем диапазоне давлений.

На рис. 2 показаны также размеры применяемых в настоящее время единиц давления, которые подлежат изъятию по мере внедрения единиц СИ (кгс/м<sup>2</sup>, кгс/см<sup>2</sup>, мм вод.ст., мм рт.ст., psi). Как видно из рисунка, размеры этих единиц не соответствуют размерам узаконенных единиц. Поэтому помимо последних в период перехода на СИ допускается применение кратных Па единиц с приставками, предусмотренными СИ, размеры которых близки размерам старых единиц. Так, взамен кгс/м<sup>2</sup> и

Таблица 1

| Наименование единиц                                           | Па                    | бар                      | кгс/см <sup>2</sup>     | кгс/м <sup>2</sup> (мм вод.ст.)          | мм рт.ст. (торр)        | фунт-сила на кв. дюйм   |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                                               | Pa                    | Bar                      | kgf/cm <sup>2</sup>     | kgf/m <sup>2</sup> (mm H <sub>2</sub> O) | mm Hg (Torr)            | psi                     |
| Паскаль                                                       | 1                     | $1 \cdot 10^{-5}$        | $1,01972 \cdot 10^{-5}$ | $1,01972 \cdot 10^{-1}$                  | $7,50062 \cdot 10^{-3}$ | $1,45038 \cdot 10^{-4}$ |
| Бар                                                           | $1 \cdot 10^5$        | 1                        | 1,01972                 | $1,01972 \cdot 10^4$                     | $7,50062 \cdot 10^2$    | $1,45038 \cdot 10$      |
| Килограмм-сила на квадратный сантиметр                        | $0,980665 \cdot 10^5$ | 0,980665                 | 1                       | $1 \cdot 10^4$                           | $7,35559 \cdot 10^2$    | 14,2233                 |
| Килограмм-сила на квадратный метр (миллиметр водяного столба) | 9,80665               | $0,980665 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-4}$       | 1                                        | $7,35559 \cdot 10^{-2}$ | $1,42233 \cdot 10^{-3}$ |
| Миллиметр ртутного столба (торр)                              | $1,33322 \cdot 10^2$  | $1,33322 \cdot 10^{-3}$  | $1,35951 \cdot 10^{-3}$ | 13,5951                                  | 1                       | $1,93368 \cdot 10^{-2}$ |
| Фунт-сила на квадратный дюйм                                  | $6,89476 \cdot 10^3$  | $6,89476 \cdot 10^{-2}$  | $7,03070 \cdot 10^{-2}$ | $7,03070 \cdot 10^2$                     | 51,7149                 | 1                       |





-1; 
 -2; 
 -3; 
 -4

Рис. 2. Диапазоны давления, охватываемые единицей давления (Па) и ее десятичными кратными:

1 — единицы давления, установленные СИ; 2 — единицы давления с приставками, разрушенными СИ; 3 — единицы давления, основанные на единице бар, допускаемые к применению до принятия международного решения; 4 — единицы давления ГПа и набор (1 ГПа = 10 мбар)

мм вод.ст. целесообразно вводить даПа ( $1 \text{ кгс/м}^2 = 1 \text{ мм вод.ст.} \approx 1 \text{ даПа}$ ), а взамен мм рт.ст. — гПа, так как их размеры примерно одного порядка.

Особое место среди применяемых в настоящее время единиц занимает единица давления бар, которая имеет размер, кратный размеру Па ( $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$ ), но при этом коэффициент кратности  $10^5$  не предусмотрен СИ. К тому же указанная единица имеет собственное наименование и вместе с ее дольными и кратными единицами (мбар, кбар) образует формально не зависимый от Па ряд, что противоречит основным принципам построения СИ. Вместе с тем, единица бар имеет ряд очевидных достоинств. Применение единицы давления бар, сохраняя десятичную кратность к основной единице Па, во многом упрощает переградуировку приборов при изъятии старых единиц ( $\text{кгс/см}^2$ ); дольная единица мбар численно равна гПа; кратная единица кбар более удобна при измерениях высоких и сверхвысоких давлений, чем ГПа. Благодаря указанному единицы бар, мбар и кбар находят в настоящее время широкое применение и будут применяться вплоть до принятия соответствующего международного решения.

### Контрольный вопрос № 1

Зависит ли размер единицы давления от вида измеряемого давления — абсолютное или избыточное давление, разность давлений? Да или нет?

Если Вы решите, что „да” — см. с. 15; если „нет” — см. с. 16 ...

## 1.3. Методы и средства измерения давления

Методы измерения давления во многом определяют как принципы действия, так и конструктивные особенности средств измерений. В этой связи в первую очередь следует остановиться на наиболее общих методологических вопросах техники измерения давления.

Давление, исходя из самых общих позиций, может быть определено как путем его непосредственного измерения, так и посредством измерения другой физической величины, функционально связанной с измеряемым давлением.

В первом случае измеряемое давление воздействует непосредственно на чувствительный элемент прибора, который передает информацию о значении давления последующим звеньям измерительной цепи, преобразующим ее в требуемую форму. Этот метод определения давления является методом прямых измерений и получил наибольшее распространение в технике измерения давления. На нем основаны принципы действия большинства манометров и измерительных преобразователей давления.

Во втором случае непосредственно измеряются другие физические величины или параметры, характеризующие физические свойства измеряемой среды, значения которых закономерно связаны с давлением (температура кипения жидкости, скорость распространения ультразвука, теплопроводность газа и т. д.). Этот метод является методом косвенных измерений давления и применяется, как правило, в тех случаях, ког-

да прямая метод тем или иным причинением неприменим, например, при измерении сверхнизкого давления (вакуумная техника) или при измерении высоких и сверхвысоких давлений.

Методологически не менее важен и вопрос о способе, которым средство измерений воспроизводит единицу давления, что непосредственно сказывается на его функциональных возможностях.

Давление является производной физической величиной, определяемой тремя основными физическими величинами — массой, длиной и временем. Конкретная реализация значения давления зависит от способа воспроизведения единицы давления. При измерении по формуле (1.1) давление определяется силой и площадью, а по формуле (1.6) — длиной, плотностью и ускорением. Методы определения давления, основанные на измерении указанных величин, являются абсолютными (фундаментальными) методами и применяются при воспроизведении единицы давления эталонами грузопоршневого и жидкостного типа, а также позволяют, при необходимости, производить аттестацию образцовых средств измерений.

Относительный метод измерений, в отличие от абсолютного, основан на предварительном исследовании зависимости от давления физических свойств и параметров чувствительных элементов средств измерения давления при методах прямых измерений или других физических величин и свойств измеряемой среды — при методах косвенных измерений. Например, деформационные манометры перед их применением для измерения давления должны быть сначала отградуированы по образцовым средствам измерений соответствующей точности.

Помимо классификации по основным методам измерений и видам давления, средства измерений давления классифицируют по принципу действия, функциональному назначению, диапазону и точности измерений.

Наиболее существенный классификационный признак — принцип действия средства измерения давления, в соответствии с ним и построено дальнейшее изложение.

Современные средства измерений давления представляют собой измерительные системы, звенья которых имеют различное функциональное назначение. Обобщенные блок-схемы манометров и измерительных преобразователей давления приведены соответственно на рис. 3, а и б. Важнейшим звеном любого средства измерения давления является его чувствительный элемент (ЧЭ), который воспринимает измеряемое давление и преобразует его в первичный сигнал, поступающий в измерительную цепь прибора. С помощью промежуточных преобразователей сигнал от ЧЭ преобразуется в показания манометра или регистрируется им, а в измерительных преобразователях (ИПД) — в унифицированный выходной сигнал, поступающий в системы измерения, контроля, регулирования и управления. При этом промежуточные преобразователи и вторичные приборы во многих случаях унифицированы и могут применяться в сочетании с ЧЭ различных типов. Поэтому принципиальные особенности манометров и ИПД зависят, в первую очередь, от типа ЧЭ.

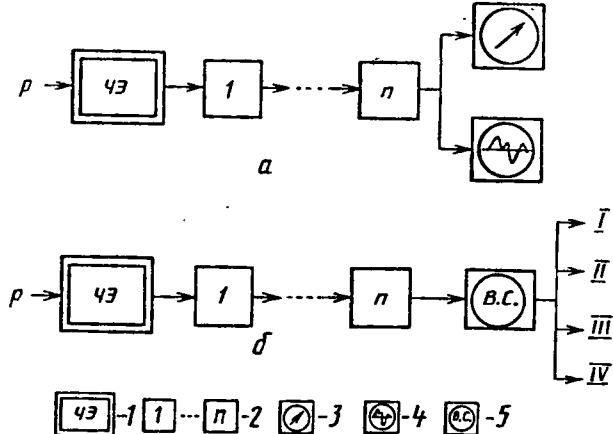


Рис. 3. Структурные блок-схемы:

*а* — манометра; *б* — измерительного преобразователя давления; *p* — измеряемое давление; *1* — чувствительный элемент (первичный преобразователь); *2* — промежуточные преобразователи; *3* — показания; *4* — регистрация; *5* — выходной сигнал; → к системам: *I* — измерения и контроль; *II* — регистрации; *III* — регулирования; *IV* — управления

### К контрольному вопросу № 1

Итак, Вы решили, что размер единицы давления зависит от вида измеряемого давления. Вы ошиблись. Повторите заново разд. 1.1 и 1.2.

Обратите внимание на то, что давление как физическая величина не зависит от начала его отсчета. В то же время иногда к обозначению единицы давления добавляют буквенный индекс, указывающий на вид давления, который измеряется данным манометром. Например, для единицы давления *psi* (фунт на кв. дюйм): *psi a* — абсолютное давление; *psi g* — избыточное давление; *psi d* — разность давлений.

По принципу действия ЧЭ средства измерения давления можно разделить на следующие основные группы.

1. Средства измерения давления, основанные на прямых абсолютных методах: поршневые манометры и ИПД, в том числе и грузопоршневые манометры, манометры с нецилиндрическим неуплотненным поршнем, колокольные, кольцевые и жидкостные манометры.

В первых трех манометрах метод измерений реализуется уравнением (1.1), основанным на определении величины давления по отношению силы к площади; в жидкостных манометрах — уравнением (1.6), основанным на уравнивании давления столбом жидкости.

2. Средства измерения давления, основанные на прямых относительных методах: деформационные манометры и ИПД, в том числе и с силовой компенсацией; полупроводниковые манометры и ИПД; манометры

других типов, основанные на изменении физических свойств ЧЗ под действием давления.

3. Средства измерения давления, основанные на методах косвенных измерений: установки и приборы для определения давления по результатам измерения других физических величин; установки и приборы для определения давления по результатам измерения параметров физических свойств измеряемой среды (термопарные и ионизационные вакуумметры, ультразвуковые манометры, вязкостные вакуумметры и др.).

#### К контрольному вопросу № 1

Ответив нет, Вы показали понимание физической сущности термина „давления”. Продолжайте изучение дальнейших глав учебника.

Следует отметить, что абсолютные методы измерений, заложенные в поршневых и жидкостных манометрах, во многих случаях на практике не реализуются. Например, жидкостные манометры, исключая первичные эталоны, градуируются и поверяются не абсолютным, а относительным методом, путем их сличения с образцовыми средствами измерений соответствующей точности.

## Глава 2. ЖИДКОСТНЫЕ МАНОМЕТРЫ

Вопросы водоснабжения для человечества всегда были очень важными, а особую актуальность приобрели с развитием городов и появлением в них различного вида производств. При этом все более актуальной становилась проблема измерения давления воды, т. е. напора, необходимого не только для обеспечения подачи воды через систему водоснабжения, но и для приведения в действие различных механизмов. Честь первооткрывателя принадлежит крупнейшему итальянскому художнику и ученому Леонардо да Винчи (1452–1519 гг.), который впервые применил пьезометрическую трубку для измерения давления воды в трубопроводах. К сожалению, его труд „О движении и измерении воды” был опубликован лишь в XIX веке. Поэтому принято считать, что впервые жидкостный манометр был создан в 1643 г. итальянскими учеными Торричелли и Вивiani, учениками Галилео Галилея, которые при исследовании свойств ртути, помещенной в трубку обнаружили существование атмосферного давления. Так появился ртутный барометр. В течение последующих 10–15 лет во Франции (Б. Паскаль и Р. Декарт) и Германии (О. Герике) были созданы различные разновидности жидкостных барометров, в том числе и с водяным заполнением. В 1652 г. О. Герике продемонстрировал весомость атмосферы эффектным опытом с откачанными полушариями, которые не могли разъединить две упряжки лошадей (знаменитые „магдебургские полушария”).

Дальнейшее развитие науки и техники привело к появлению большого количества жидкостных манометров различных типов, применяемых до настоящего времени во многих отраслях: метеорологии, авиационной и электровакуумной технике, геодезии и геологоразведке, физике и метрологии и пр. Однако, в силу ряда специфических особенностей принципа действия жидкостных манометров их удельный вес по сравнению с манометрами других типов относительно невелик и, вероятно, будет уменьшаться и в дальнейшем. Тем не менее при измерениях особо высокой точности в области давлений, близких к атмосферному давлению, они пока незаменимы. Не потеряли своего значения жидкостные манометры и в ряде других областей (микromanометрии, барометрии, метеорологии, при физико-технических исследованиях).

## 2.1. Основные типы жидкостных манометров и принципы их действия

Принцип действия жидкостных манометров можно проиллюстрировать на примере U-образного жидкостного манометра (рис. 4, а), состоящего из двух соединенных между собой вертикальных трубок 1 и 2,

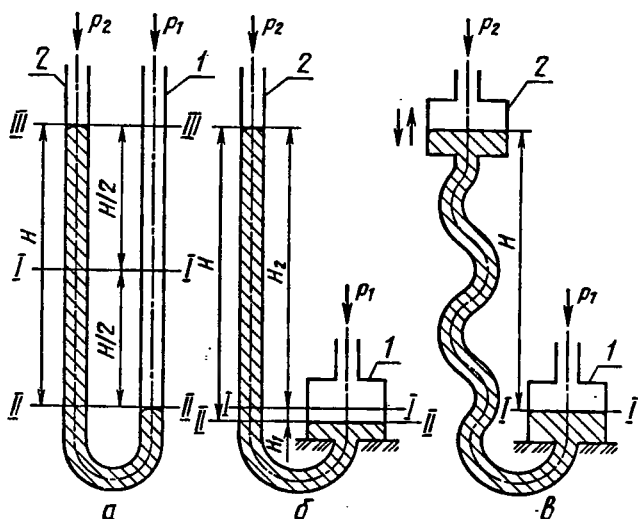


Рис. 4. Основные типы жидкостных манометров

наполовину заполненных жидкостью. В соответствии с законами гидростатики при равенстве давлений  $p_1$  и  $p_2$  свободные поверхности жидкости (мениски) в обеих трубках установятся на уровне I—I. Если одно из давлений превышает другое ( $p_1 > p_2$ ), то разность давлений вызовет опускание уровня жидкости в трубке 1 и, соответственно, подъем в трубке 2, вплоть до достижения состояния равновесия. При этом на уровне II—II уравнение равновесия примет вид

$$\Delta p = p_1 - p_2 = H \cdot \rho \cdot g, \quad (2.1)$$

т. е. разность давлений определяется давлением столба жидкости высотой  $H$  с плотностью  $\rho$ .

Уравнение (1.6) с точки зрения измерения давления является фундаментальным, так как давление, в конечном итоге, определяется основными физическими величинами — массой, длиной и временем. Это уравнение справедливо для всех без исключения типов жидкостных манометров. Отсюда следует определение, что жидкостный манометр — манометр, в котором измеряемое давление уравновешивается давлением столба жидкости, образующегося под действием этого давления. Важно подчеркнуть, что мерой давления в жидкостных манометрах является

высота столба жидкости. Именно это обстоятельство привело к появлению единиц измерений давления мм вод. ст., мм рт. ст. и других которые естественным образом вытекают из принципа действия жидкостных манометров.

Чашечный жидкостный манометр (рис. 4, б) состоит из соединенных между собой чашки 1 и вертикальной трубки 2, причем площадь поперечного сечения чашки существенно больше, чем трубки. Поэтому под воздействием разности давлений  $\Delta p$  изменение уровня жидкости в чашке гораздо меньше, чем подъем уровня жидкости в трубке:  $H_1 = H_2 \cdot f/F$ , где  $H_1$  — изменение уровня жидкости в чашке;  $H_2$  — изменение уровня жидкости в трубке;  $f$  — площадь сечения трубки;  $F$  — площадь сечения чашки.

Отсюда высота столба жидкости, уравнивающей измеряемое давление  $H = H_1 + H_2 = H_2 (1 + f/F)$ , а измеряемая разность давлений

$$p_1 - p_2 = H_2 \cdot \rho \cdot g (1 + f/F). \quad (2.2)$$

Поэтому при известном коэффициенте  $k = 1 + f/F$  разность давлений может быть определена по изменению уровня жидкости в одной трубке, что упрощает процесс измерений.

Двухчашечный манометр (рис. 4, в) состоит из двух соединенных при помощи гибкого шланга чашек 1 и 2, одна из которых жестко закреплена, а вторая может перемещаться в вертикальном направлении. При равенстве давлений  $p_1$  и  $p_2$  чашки, а следовательно, свободные поверхности жидкости находятся на одном уровне I—I. Если  $p_1 > p_2$ , то чашка 2 поднимается вплоть до достижения равновесия в соответствии с уравнением (2.1).

Единство принципа действия жидкостных манометров всех типов обуславливает их универсальность с точки зрения возможности измерения давления любого вида — абсолютного и избыточного и разности давлений.

Абсолютное давление будет измерено, если  $p_2 = 0$ , т. е. когда пространство над уровнем жидкости в трубке 2 откачено. Тогда столб жидкости в манометре будет уравнивать абсолютное давление в трубке 1, т. е.  $p_{\text{абс}} = H \cdot \rho \cdot g$ .

При измерении избыточного давления одна из трубок сообщается с атмосферным давлением, например,  $p_2 = p_{\text{атм}}$ . Если при этом абсолютное давление в трубке 1 больше чем атмосферное давление ( $p_1 > p_{\text{атм}}$ ), то в соответствии с (1.6) столб жидкости в трубке 2 уравнивает избыточное давление в трубке 1, т. е.  $p_{\text{и}} = H \cdot \rho \cdot g$ . Если, наоборот,  $p_1 < p_{\text{атм}}$ , то столб жидкости в трубке 1 будет мерой отрицательного избыточного давления  $p_{\text{и}} = -H \cdot \rho \cdot g$ .

При измерении разности двух давлений, каждое из которых не равно атмосферному давлению, уравнение измерений имеет вид  $\Delta p = p_1 - p_2 = H \cdot \rho \cdot g$ . Так же, как и в предыдущем случае, разность может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

К важной метрологической характеристике средств измерения давления относится чувствительность измерительной системы, которая

во многом определяет точность отсчета при измерениях и инерционность. Для манометрических приборов под чувствительностью понимается отношение изменения показаний прибора к вызвавшему его изменению давления ( $n = \Delta H / \Delta p$ ). В общем случае, когда чувствительность непостоянна в диапазоне измерений

$$n = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{\Delta H}{\Delta p} \quad \text{при } \Delta p \rightarrow 0, \quad (2.3)$$

где  $\Delta H$  — изменение показаний жидкостного манометра;  $\Delta p$  — соответствующее изменение давления.

Принимая во внимание уравнения измерений, получим:

чувствительность U-образного или двухчашечного манометра (см. рис. 4, а и 4, б)

$$n = \frac{1}{\rho \cdot g}, \quad (2.4, a)$$

чувствительность чашечного манометра (см. рис. 4, б)

$$n = \frac{1}{\rho \cdot g(1 + f/F)}. \quad (2.4, б)$$

Как правило, для чашечных манометров  $F \gg f$ , поэтому уменьшение их чувствительности по сравнению с U-образными манометрами незначительно.

Из уравнений (2.4, а) и (2.4, б) следует, что чувствительность целиком определяется плотностью жидкости  $\rho$ , заполняющей измерительную систему прибора. Но, с другой стороны, значение плотности жидкости согласно (1.6) определяет диапазон измерений манометра: чем она больше, тем больше верхний предел измерений. Таким образом, относительное значение погрешности отсчета от значения плотности не зависит. Поэтому для увеличения чувствительности, а следовательно, и точности, разработано большое количество отсчетных устройств, основанных на различных принципах действия, начиная от фиксации положения уровня жидкости относительно шкалы манометра на глаз (погрешность отсчета около 1 мм) и кончая применением точнейших интерференционных методов (погрешность отсчета 0,1–0,2 мкм). С некоторыми из этих методов можно познакомиться ниже.

Диапазоны измерений жидкостных манометров в соответствии с (1.6) определяются высотой столба жидкости, т. е. размерами манометра и плотностью жидкости. Наиболее тяжелой жидкостью в настоящее время является ртуть, плотность которой  $\rho = 1,35951 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$ . Столб ртути высотой 1 м развивает давление около 136 кПа, т. е. давление, не на много превышающее атмосферное давление. Поэтому при измерении давлений порядка 1 МПа размеры манометра по высоте соизмеримы с высотой трехэтажного дома, что представляет существенные эксплуатационные неудобства, не говоря о чрезмерной громоздкости конструкции. Тем не менее, попытки создания сверхвысоких ртутных манометров предпринимались. Мировой рекорд был установлен в Париже,



где на базе конструкции знаменитой Эйфелевой башни был смонтирован манометр высотой ртутного столба около 250 м, что соответствует 34 МПа. В настоящее время этот манометр разобран в связи с его бесперспективностью. Однако в строю действующих продолжает оставаться уникальный по своим метрологическим характеристикам ртутный манометр Физико-технического института ФРГ. Этот манометр, смонтированный в 10-этажной башне, имеет верхний предел измерений 10 МПа с погрешностью менее 0,005 %. Подавляющее большинство ртутных манометров имеют верхние пределы порядка 120 кПа и лишь изредка до 350 кПа. При измерении относительно небольших давлений (до 10–20 кПа) измерительная система жидкостных манометров заполняется водой, спиртом и другими легкими жидкостями. При этом диапазоны измерений обычно составляют до 1–2,5 кПа (микроманометры). Для еще более низких давлений разработаны способы увеличения чувствительности без применения сложных отсчетных устройств.

Микроманометр (рис. 5), состоит из чашки 1, которая соединена с трубкой 2, установленной под углом  $\alpha$  к горизонтальному уровню

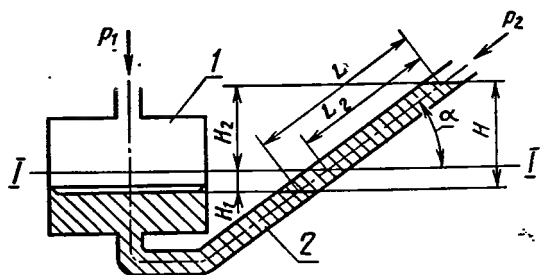


Рис. 5. Чашечный микроманометр с наклонной трубкой

I—I. Если при равенстве давлений  $p_1$  и  $p_2$  поверхности жидкости в чашке и трубке находились на уровне I—I, то увеличение давления в чашке ( $p_1 > p_2$ ) вызовет опускание уровня жидкости в чашке и ее подъем в трубке. При этом высота столба жидкости  $H_2$  и его длина по оси трубки  $L_2$  будут связаны соотношением  $H_2 = L_2 \sin \alpha$ .

Учитывая уравнение неразрывности жидкости  $H, F = L_2 \cdot f$ , нетрудно получить уравнение измерений микроманометра

$$p_1 - p_2 = H \cdot \rho \cdot g = L_2 \cdot \rho \cdot g \left( \sin \alpha + \frac{f}{F} \right), \quad (2.5)$$

где  $L_2$  — перемещение уровня жидкости в трубке вдоль ее оси;  $\alpha$  — угол наклона трубки к горизонту; остальные обозначения прежние.

Из уравнения (2.5) следует, что при  $\sin \alpha \ll 1$  и  $f/F \ll 1$  перемещение уровня жидкости в трубке во много раз превышает высоту столба жидкости, необходимую для уравновешивания измеряемого давления.

Чувствительность микроманометра с наклонной трубкой в соответствии с (2.5)

$$n = \frac{\Delta L}{\Delta p} = \frac{1}{\rho \cdot g (\sin \alpha + f/F)} \quad (2.6)$$

Как видно из (2.6), максимальная чувствительность микроманометра при горизонтальном расположении трубки ( $\alpha = 0$ )

$$n_{\max} = \frac{F}{f} \cdot \frac{1}{\rho \cdot g},$$

т. е. в отношении площадей чашки и трубки больше, чем у U-образного манометра.

Второй способ увеличения чувствительности состоит в уравнивании давления столбом двух несмешивающихся жидкостей. Двухчашечный манометр (рис. 6) заполняется жидкостями так, чтобы граница их

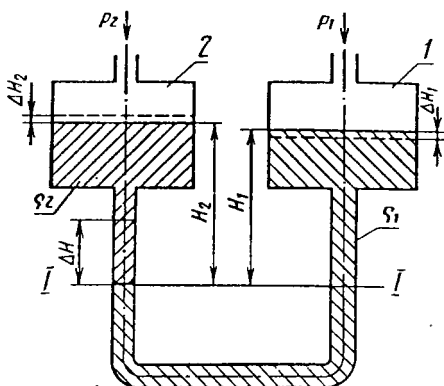


Рис. 6. Двухчашечный микроманометр с двумя жидкостями ( $\rho_1 > \rho_2$ )

раздела находилась в пределах вертикального участка трубки, примыкающей к чашке 2. При  $p_1 = p_2$  давление на уровне I—I

$$H_1 \rho_1 = H_2 \rho_2 \quad (\rho_1 > \rho_2).$$

Тогда при повышении давления в чашке 1 уравнение равновесия будет иметь вид

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta H [(\rho_1 - \rho_2) + f/F(\rho_1 + \rho_2)] g, \quad (2.7)$$

где  $\rho_1$  — плотность жидкости в чашке 1;  $\rho_2$  — плотность жидкости в чашке 2.

Кажущаяся плотность столба двух жидкостей

$$\rho_k = (\rho_1 - \rho_2) + f/F(\rho_1 + \rho_2). \quad (2.8)$$

Если плотности  $\rho_1$  и  $\rho_2$  имеют близкие друг другу значения, а  $f/F \ll 1$ , то кажущаяся или эффе́ктивная плотность может быть снижена до величины  $\rho_{\min} = f/F(\rho_1 + \rho_2) \cong 2\rho_1 f/F$ .

При этом, соответственно, увеличивается чувствительность

$$n = \frac{\Delta H}{\Delta p} = \frac{1}{\rho_k \cdot g}, \quad (2.9)$$

где  $\rho_k$  — кажущаяся плотность в соответствии с (2.8).

Так же, как и ранее, увеличение чувствительности указанными способами автоматически уменьшает диапазоны измерений жидкостного манометра, что ограничивает их применение областью микроманометрии. Учитывая также большую чувствительность рассматриваемых способов к влиянию температуры при точных измерениях, как правило, находят применение способы, основанные на точных измерениях высоты столба жидкости, хотя это и усложняет конструкции жидкостных манометров.

## 2.2. Поправки к показаниям и погрешности жидкостных манометров

В уравнения измерений жидкостных манометров в зависимости от их точности необходимо вводить поправки, учитывающие отклонения условий эксплуатации от условий градуировки, вид измеряемого давления и особенности принципиальной схемы конкретных манометров.

Условия эксплуатации определяются температурой и ускорением свободного падения в месте измерений. Под влиянием температуры изменяются как плотность жидкости, применяемой при уравнивании давления, так и длина шкалы. Ускорение свободного падения в месте измерений, как правило, не соответствует его нормальному значению, принятому при градуировке. Поэтому давление

$$p = p_n \cdot \left[ 1 + \alpha(t - t'_n) + \beta(t''_n - t) + \frac{g - g_n}{g_n} \right], \quad (2.10)$$

где  $p_n = H \cdot \rho_n \cdot g_n$  — показания манометра;  $t$  — температура шкалы и жидкости во время измерений;  $t'_n = 20^\circ\text{C}$  — температура, при которой отградуирована шкала;  $t''_n$  — температура, соответствующая принятой при градуировке плотности жидкости;  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения шкалы;  $\beta$  — температурный коэффициент объемного расширения жидкости;  $\rho_n$  — плотность жидкости при температуре  $t'_n$ ;  $g$  — ускорение свободного падения в месте измерений;  $g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2$  — нормальное ускорение свободного падения.

В условиях эксплуатации жидкостных манометров температура в помещении, как правило, не выходит из диапазона  $t = 15\text{--}30^\circ\text{C}$ . При этом коэффициент  $\alpha$  практически постоянен, а температура  $t'_n = 20^\circ\text{C}$ . Поэтому соответствующая поправка

$$\Delta p_{\text{ш}} = p_n \cdot \alpha(t - 20). \quad (2.11)$$

В зависимости от материала шкалы  $\alpha$  в  $^\circ\text{C}^{-1}$  равна для: латуни —  $19 \cdot 10^{-6}$ ; стали —  $11 \cdot 10^{-6}$ ; стекла —  $8,5 \cdot 10^{-6}$ . В лабораторных условиях при  $t = (20 \pm 5)^\circ\text{C}$  поправка не превышает  $\pm 0,01\%$ .

Температурный коэффициент  $\beta$  в общем случае зависит от температуры измерений. Так, для воды в диапазоне  $t = 15-30^\circ\text{C}$  он изменяется в 4 раза, а для ртути он менее 1 %. По-разному определяется и начальное значение плотности жидкости: для ртути  $\rho_n = 1,35951 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$  при  $t_n'' = 0^\circ\text{C}$ , для воды  $\rho_n = 1000 \text{ кг/м}^3$  при  $t_n'' = 4^\circ\text{C}$ . Поэтому поправку на изменение плотности жидкости целесообразно представить в виде

$$\Delta p_\rho = p_n \cdot \beta(t_n'' - t) = p_n \cdot \frac{\rho_t - \rho_n}{\rho_n}, \quad (2.12)$$

где  $\rho_t$  — плотность жидкости при температуре  $t$  (табл. 3, 4);  $\rho_n = 13,5951 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  для ртути;  $\rho_n = 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  для воды.

Эта поправка в диапазоне комнатных температур (от  $15$  до  $25^\circ\text{C}$ ) составляет: для ртути от  $-0,27$  до  $-0,54\%$  и для воды от  $-0,09$  до  $-0,44\%$  от измеряемого давления, что необходимо учитывать практически во всех случаях.

Поправка на местное ускорение свободного падения

$$\Delta p_g = p_n \cdot \frac{g - g_n}{g_n}, \quad (2.13)$$

где  $g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2$  — нормальное ускорение свободного падения.

В нашей стране ускорение свободного падения изменяется в диапазоне от  $9,79$  до  $9,82 \text{ м/с}^2$  и, соответственно, значение поправки составляет  $\pm 0,15\%$  измеряемого давления, чем во многих случаях пренебрегать нельзя.

Указанные выше поправки относятся ко всем типам жидкостных манометров. Их относительные значения приведены в табл. 2–5.

В табл. 2 приведена поправка на температурное расширение шкалы  $\Delta p_{\text{ш}}/p_n \cdot 10^4$  (латунь,  $\alpha = 19 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ); в табл. 3 — поправка на температурное изменение плотности ртути  $\Delta p_\rho/p_n \cdot 10^4$  (поправка отрицательная); в табл. 4 — поправка на температурное изменение плотности воды  $\Delta p_\rho/p_n \cdot 10^4$  (поправка отрицательная); в табл. 5 — поправка на местное ускорение свободного падения  $\Delta p_g/p_n \cdot 10^4$ .

Таблица 2

| Температура,<br>$^\circ\text{C}$ | $\Delta p_{\text{ш}}/p_n$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                  | 0                         | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 10                               | -1,90                     | -1,71 | -1,52 | -1,33 | -1,14 | -0,95 | -0,76 | -0,57 | -0,38 | -0,19 |
| 20                               | 0                         | 0,19  | 0,38  | 0,57  | 0,76  | 0,95  | 1,14  | 1,33  | 1,52  | 1,71  |
| 30                               | 1,90                      | 2,09  | 2,28  | 2,47  | 2,66  | 2,85  | 3,04  | 3,23  | 2,43  | 3,61  |

| Температура,<br>°C | $\Delta p_p/p_n$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                    | 0                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| 10                 | 18,2             | 20,0 | 21,8 | 23,6 | 25,4 | 27,2 | 29,0 | 30,8 | 32,6 | 34,4 |
| 20                 | 36,2             | 38,0 | 39,8 | 41,6 | 43,4 | 45,2 | 47,0 | 48,8 | 50,6 | 52,4 |
| 30                 | 54,2             | 56,0 | 57,8 | 59,6 | 61,4 | 63,2 | 65,0 | 66,8 | 68,6 | 70,4 |

Таблица 4

| Температура, °C | $\Delta p_p/p_n \cdot 10^4$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | 0                           | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 10              | 3,00                        | —     | —     | —     | —     | 9,01  | 10,57 | 12,25 | 14,05 | 15,95 |
| 20              | 17,95                       | 20,08 | 22,20 | 24,62 | 27,04 | 29,55 | 32,17 | 34,87 | 37,67 | 40,55 |
| 30              | 43,53                       | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     |

Таблица 5

| Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup> | $\Delta p_p/p_n \cdot 10^4$ |       |       |       |       |
|------------------------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                | 0,000                       | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 |
| 9,790                                          | -16,9                       | -15,9 | -14,9 | -13,9 | -12,9 |
| 9,800                                          | -6,8                        | -5,8  | -4,7  | -3,7  | -2,7  |
| 9,810                                          | +3,4                        | +4,4  | +5,5  | +6,5  | +7,5  |
| 9,820                                          | +13,6                       | +14,6 | +15,6 | +16,6 | +17,7 |

Продолжение

| Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup> | $\Delta p_p/p_n \cdot 10^4$ |       |       |       |       |
|------------------------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                | 0,005                       | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,009 |
| 9,790                                          | -11,9                       | -10,9 | -9,8  | -8,8  | -7,8  |
| 9,800                                          | -1,7                        | -0,7  | +0,4  | +1,4  | +2,4  |
| 9,810                                          | +8,5                        | +9,5  | +10,5 | +16,6 | +17,7 |
| 9,820                                          | +18,7                       | +19,7 | +20,7 | +21,8 | +22,8 |

Еще одна общая для всех жидкостных манометров поправка, учитывающая влияние столба газа, давление которого измеряется манометром, должна приниматься во внимание при точных измерениях.

Для сопоставления результатов измерений давления газа  $p_1$  и  $p_2$  приводят к одному горизонтальному уровню. Тогда, с учетом давления столба газа, уравнение равновесия на уровне II—II принимает вид (см. рис. 4, а)

$$p_1 + H \cdot \rho_1 \cdot g = p_2 + H \cdot \rho \cdot g,$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — давления газа на уровне III—III;  $\rho_1$  — плотность газа при давлении  $p_1$ ;  $\rho$  — плотность жидкости.

При этом измеряемая разность давлений, в отличие от (1.6), на уровне III—III будет

$$p_1 - p_2 = H \cdot \rho \cdot g \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho}\right). \quad (2.14)$$

Плотность газа при давлении  $p_1$  определяется из соотношения  $\rho_1 = \rho_{01} \cdot p_1 / p_{\text{атм}}$ , где  $\rho_{01}$  — плотность газа при атмосферном давлении  $p_{\text{атм}}$ .

Учитывая изложенное, поправка на давление столба газа будет

$$\Delta p_2 = -H \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\rho_{01}}{\rho} \cdot \frac{p_1}{p_{\text{атм}}} \cong -(p_1 - p_2) \cdot \frac{\rho_{01}}{\rho} \cdot \frac{p_1}{p_{\text{атм}}}. \quad (2.15)$$

Здесь принимается, что плотность жидкости, которая при средних давлениях практически несжимаема, не зависит от давления.

Относительное значение поправки соответственно равно

$$\frac{\Delta p_2}{p_1 - p_2} = - \frac{\rho_{01}}{\rho} \cdot \frac{p_1}{p_0}, \quad (2.16)$$

т. е. прямо пропорционально абсолютному давлению газа в трубке 1.

В отличие от предыдущих рассматриваемая поправка существенно зависит от вида измеряемого давления. На рис. 7 приведены значения поправок для наиболее распространенных на практике манометров, заполненных ртутью: 1 — измеряемая газовая среда — воздух; 2 — соответственно, вода и воздух.

При измерениях абсолютного и избыточного давлений поправка пропорциональна измеряемому давлению, а при измерении разности давлений, она, кроме того, зависит от статического (рабочего) давления  $p_2$ . Например, если при измерении абсолютного давления, положительного и отрицательного давлений, равных 100 кПа, поправки, соответственно, равны: для ртути:  $-0,009$ ,  $-0,018$  и  $0\%$ ; для воды:  $-0,11$ ,  $-0,28$  и  $0\%$ , то при измерении той же разности давлений при  $p_2 = 1000$  кПа поправки составляют: для ртути  $-0,097\%$ ; для воды  $-1,32\%$ .

Таким образом, вопрос об учете рассматриваемой поправки должен решаться в зависимости от требуемой точности измерений и вида измеряемого давления.

Вторая группа поправок зависит от качества изготовления жидкостных манометров и их конструктивных особенностей, т. е. относится к инструментальным поправкам.

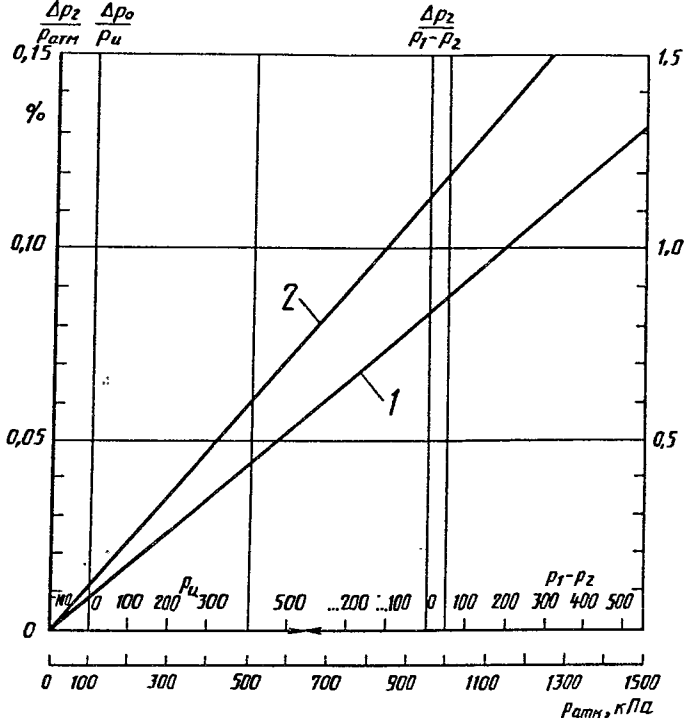


Рис. 7. Поправки на влияние столба воздуха

В первую очередь, здесь следует отметить поправки, связанные с неточностью шкал и неостоянством площадей поперечного сечения трубок и чашек по их высоте, если высота столба жидкости определяется путем измерения положения одного из уровней, например, уровня жидкости в трубке чашечного манометра. Значения этих поправок определяются путем сличения показаний жидкостного манометра с показаниями образцового манометра высшего разряда или косвенным, поэлементным методом.

### Контрольный вопрос № 2

Вам необходимо с помощью U-образного манометра измерить давление воздуха на уровне менисков жидкости в манометрических трубках при отсутствии давления (уровень I—I, рис. 4, а).

Каков знак поправки к показаниям U-образного манометра, связанной с отклонением менисков от нулевого уровня I—I: „+” или „-”?

Если „+” — см. с. 28, если „-” — см. с. 29.

Суммарная относительная погрешность жидкостного манометра в соответствии с уравнением измерений (1.6) в общем случае имеет вид

$$\delta_p = \delta_h + \delta_\rho + \delta_g + \sum \delta_i, \quad (2.17)$$

где  $\delta_h$ ,  $\delta_\rho$  и  $\delta_g$  — относительные погрешности определения, соответственно, высоты столба жидкости, ее плотности и ускорения свободного падения;  $\sum \delta_i$  — дополнительные погрешности.

Основные погрешности измерения  $\delta_h$ ,  $\delta_\rho$  и  $\delta_g$  обусловлены принципом действия жидкостных манометров.

**Погрешность определения высоты столба жидкости** зависит от методов и средств отсчета положения уровня жидкости относительно шкалы и измерения разности уровней жидкости в коленах жидкостного манометра.

Отсчетные устройства, применяемые в жидкостных манометрах, отличаются в зависимости от их точности как по конструкции, так и по принципу действия. В простейших устройствах положение мениска относительно шкалы манометра видно невооруженным глазом. Погрешность отсчета при этом составляет 0,5–1 мм. Применение визирного кольца с нониусом позволяет снизить погрешность отсчета до 0,05–0,1 мм. В жидкостных манометрах высокой точности нашли применение оптические методы (катетометры и отсчетные микроскопы) с погрешностью 0,01–0,02 мм, а в эталонных манометрах — интерференционные и емкостные методы, погрешность которых составляет 0,1–1 мкм. Характерная особенность этих погрешностей — их постоянство по абсолютному значению во всем диапазоне измерений.

Для измерения высота столба — разности уровней жидкости применяются: шкалы в сочетании с указанными выше отсчетными устройствами; концевые плоскопараллельные меры длины; точные ходовые винты с определением высоты по числу оборотов.

Здесь погрешности измерений определяются точностью нанесения шкал, изготовления концевых мер и ходовых винтов, а также температурными погрешностями.

Суммарная погрешность определения высоты столба жидкости по абсолютному значению

$$dH = dH' + dH'' + H \cdot \alpha \cdot dt, \quad (2.18)$$

где  $dH'$  — погрешность отсчета уровня жидкости;  $dH''$  — погрешность нанесения шкалы (концевой меры, ходового винта);  $\alpha$  — коэффициент температурного расширения;  $dt$  — погрешность измерения температуры шкалы.

Относительная погрешность определения высоты столба жидкости соответственно

$$\delta_h = \delta_{H'} + \delta_{H''} + \alpha dt. \quad (2.19)$$

При измерениях относительно небольших давлений с невысокой точностью определяющей является точность отсчета уровня  $\delta_{H'} = dH'/H$ .



Например, при  $H = 100$  мм мм и  $dH' = 1$  мм  $\delta_{H'} = 1\%$ , что существенно больше остальных составляющих погрешности. При  $H = 1000$  мм и  $dH' = 0,1$  мм  $\delta_{H'} = 0,01\%$ , что сопоставимо с величиной  $\delta_{H''}$ . Температурная погрешность при  $dt = 0,5^\circ\text{C}$  и  $\alpha = 19 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (шкала из латуни) относительно невелика  $\alpha \cdot dt \cong 0,001\%$ .

### К контрольному вопросу № 2

Ответ ошибочен, Вам необходимо еще раз просмотреть соответствующий материал разд. 2.2. При ответе Вам следует учесть давление столба воздуха в манометрической трубке.

Плотность жидкости определяется ее физическими свойствами и температурой. Погрешность определения плотности

$$\delta_{\rho} = \delta_{\rho_H} + \beta \cdot dt + (t_H - t) \cdot d\beta, \quad (2.20)$$

где  $\delta_{\rho_H}$  — погрешность определения плотности жидкости при стандартных условиях;  $\beta$  — температурный коэффициент объемного расширения;  $d\beta$  — погрешность определения коэффициента  $\beta$ ;  $t_H$  — нормальная температура, при которой определено значение  $\rho_H$ ;  $t$  — температура жидкости в момент измерений.

Плотность жидкости при условии, что она не загрязнена различными примесями определяется ее значением при стандартных условиях ( $t = t_H$ ,  $p = 100$  кПа). При относительно небольших давлениях ( $p < 1$  МПа) сжимаемостью жидкости можно пренебречь.

Для наиболее часто применяемой в барометрии ртути составляющие погрешности равны ( $\beta = 1,818 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $t_H = 0^\circ\text{C}$ ;  $d\beta = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $dt = 0,5^\circ\text{C}$ ;  $t = 25^\circ\text{C}$ ):  $\delta_{\rho_H} \leq 0,0001\%$ ;  $\beta \cdot dt = 0,01\%$ ;  $(t_H - t) \cdot d\beta = 0,0005\%$ , т. е. наибольшее влияние оказывает точность измерения температуры ртути и отклонения температуры от стандартной ( $t_H - t$ ).

Ускорение свободного падения  $g$  в месте измерений всегда может быть определено с необходимой точностью ( $\delta_g < 0,001\%$ ). Табличные значения ускорения для областных центров приводятся с округлением до  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$  (0,0025%), что в большинстве случаев достаточно.

Дополнительные погрешности обусловлены различными причинами: как общими для жидкостных манометров (капиллярные явления в свободных поверхностях жидкости, точность установки столба жидкости по вертикали), так и особенностями различных типов и конструкций.

Абсолютное значение погрешности, связанной с капиллярными явлениями, может быть определено по формуле

$$dp_K = p_K (\delta_{\sigma} + \delta_r) + \frac{2\sigma \cdot \sin \vartheta}{r} \cdot d\theta, \quad (2.21)$$

где  $p_K$  — капиллярное давление в трубке манометра;  $\delta_{\sigma}$  и  $\delta_r$  — неопределенности значений коэффициента поверхностного натяжения и радиуса трубки;  $\theta$  — угол смачивания;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $r$  — радиус трубки;  $d\theta$  — неопределенность значения угла смачивания.

При заполнении стеклянной трубки ртутью при  $r = 3$  мм,  $\theta = 140^\circ$  и  $\sigma = 0,47$  Н/м получим  $p_k = 2,3$  гПа;  $2\sigma \cdot \sin\theta/r = 2,0$  гПа.

Принимая  $\delta_\sigma = 0,2$ ,  $\delta_r = 0,1$  (при  $dr = 0,3$  мм) и  $d\theta = 0,175-0,35$  рад, получим значение погрешности  $dp_k = 1,0$  гПа, т. е. около 40% значения капиллярного давления. Поэтому введение поправки на капиллярные явления теряет смысл, а для исключения указанных погрешностей при точных измерениях применяют трубки диаметром 10–20 мм и более.

При отклонении оси манометрической трубки от вертикали давление столба жидкости, соответствующее отсчету по шкале, отличается от действительного значения на

$$\Delta p = H \cdot \rho \cdot g (1 - \cos \alpha), \quad (2.22)$$

где  $\alpha$  — угол отклонения оси трубки от вертикали.

При относительно небольших углах наклона относительную погрешность можно приближенно принять равной  $\delta_{p\alpha} \cong \alpha^2/2$ . Например, при угле наклона  $\alpha = 1^\circ = 1,74 \cdot 10^{-2}$  рад соответствующая погрешность  $\delta_{p\alpha} = 1,51 \cdot 10^{-4}$  (0,015 %), а при  $\alpha = 0,5^\circ = 0,87 \cdot 10^{-2}$  рад.,  $\delta_{p\alpha} \cong 0,38 \cdot 10^{-4}$  (0,004 %). Указанное необходимо учитывать в требованиях на точность установки манометра.

#### К контрольному вопросу № 2

Вы правы, давление воздуха на уровне I—I в соответствии с законом Паскаля меньше, чем давление на уровне II—II (рис. 4, а).

### 2.3. Конструктивные особенности жидкостных манометров

В зависимости от вида измеряемого давления, диапазона и точности измерений существенно отличаются конструкции жидкостных манометров. К числу простейших жидкостных манометров относятся U-образные манометры, выпускаемые в нашей стране по ГОСТ 9933–75.

Двухтрубный мановакуумметр типа МВ (рис. 8) состоит из стеклянной U-образной трубки 2, закрепленной на основании 1 скобами 3 и 6. Уровни жидкости 5 (дистиллированная вода или ртуть) отсчитываются по шкале 4, отградуированной в мм. При отсутствии разности давлений в обеих трубках уровни жидкости располагаются вблизи нулевой отметки. Высота столба жидкости, соответствующая измеряемому давлению по формуле (1.6), определяется по отсчетам положения уровней в трубках по шкале. Манометр достаточно универсален и позволяет измерять как положительное и отрицательное избыточные давления, так и разность давлений. Мановакуумметры типа МВ при их заполнении водой выпускаются на диапазоны измерений от 0–10 гПа (0–100 мм вод. ст.) до 0–100 гПа (0–1000 мм вод. ст.). Погрешность измерений при температуре  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$  составляет  $\pm 0,2$  гПа ( $\pm 2$  мм вод. ст.).

В двухтрубном манометре абсолютного давления типа АМ (рис. 9) в отличие от предыдущего левое колено стеклянной трубки 6 запаяно, а правое стеклянным краном 4 подключается к ниппелям 5 для соедине-

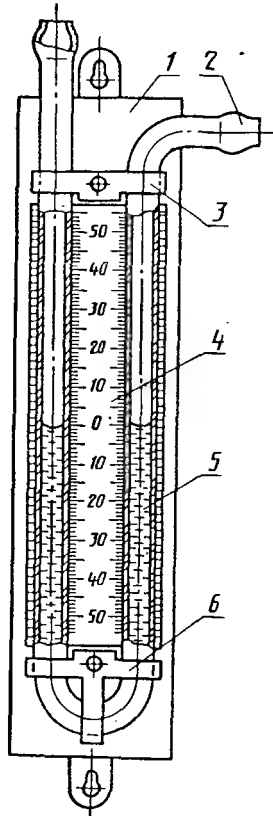


Рис. 8. Двухтрубный манометр типа МВ

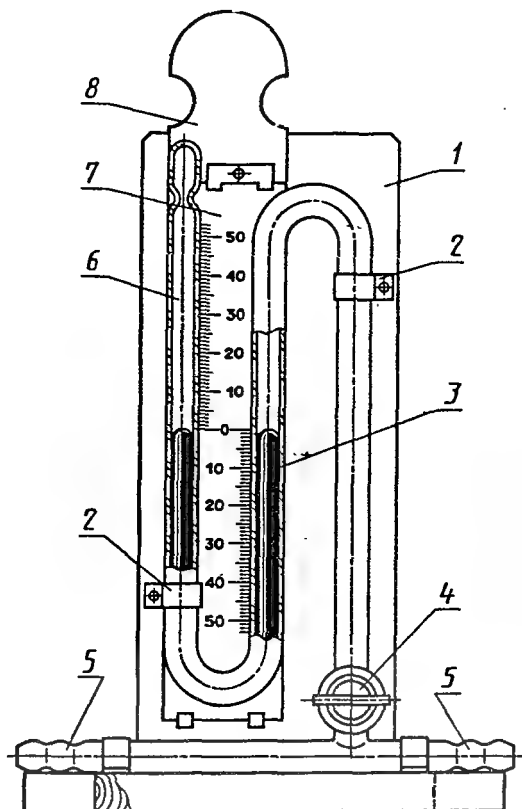


Рис. 9. Двухтрубный манометр типа АМ

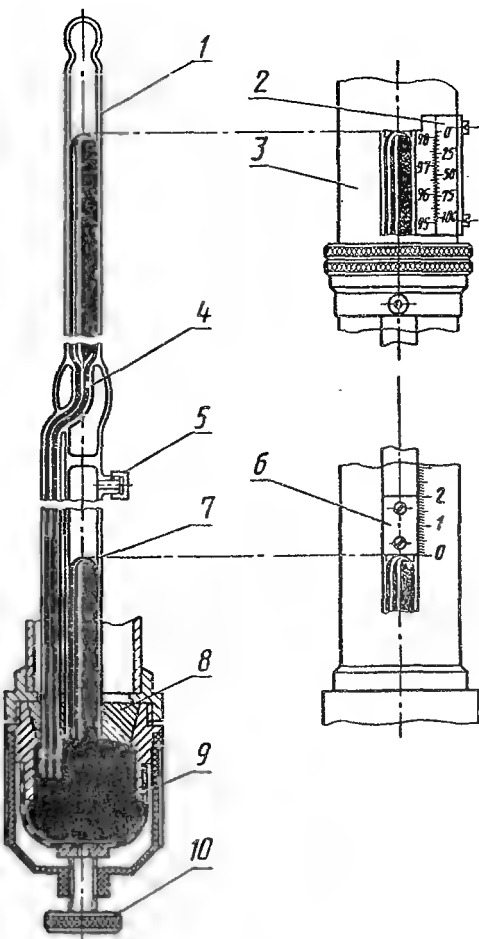
ния с откачивающим устройством и измеряемым абсолютным давлением. Стекло́нная трубка, заполненная ртутью 3, с краном и присоединительными ниппелями скобами 2 закреплена на основании 1, а шкала 7 смонтирована на держателе 8, который может смещаться относительно основания при регулировке нулевого положения. U-образная трубка перед заполнением ртутью откачивается, что обеспечивает в ее запаянном конце достаточно полный вакуум. Манометры типа АМ выпускаются с диапазонами измерений 0–130 гПа (0–100 мм рт.ст.) и 0–210 гПа (0–160 мм рт.ст.) при погрешности измерений  $\pm 2$  гПа ( $\pm 1,5$  мм рт.ст.).

При измерении атмосферного давления требования к точности измерений существенно повышаются. Для указанных целей в нашей стране Клинским ПО „Термоприбор” серийно выпускаются контрольный ртутный барометр типа КР, инспекторский ртутный барометр типа ИР, стационарные ртутные барометры типа СР-А и СР-Б и ртутные манометры аб-

солютного давления типа МБП и МЧР-3, которые нашли широкое применение в метеорологической службе, в авиационной технике, при проведении геологоразведочных и геофизических работ.

Контрольный ртутный барометр типа КР — модификация U-образного манометра, в которой для регулирования уровня ртути в трубках используется заполненный ртутью резервуар (чашка). Данный тип жидкостных приборов называют сифонно-чашечными манометрами, хотя наименование „чашечный” имеет чисто условный характер, так как резервуар заполнен ртутью полностью и в нем отсутствует свободная поверхность ртути.

Прибор (рис. 10) состоит из двух соосных стеклянных трубок 1 и 7, разделенных друг от друга стеклянной перегородкой. Трубка 1, соединенная с чашкой 8 с помощью капилляра 4, откачана; трубка 10, непосредственно соединенная с чашкой, имеет в верхней части ниппель 5 для сообщения с атмосферным давлением. Стеклянные трубки защищены металлической оправой с продольными прорезями для наблюдения менисков ртути, на которой нанесена шкала. Во время измерений мениск ртути в нижней короткой трубке винтом 10 нажимающего на дно лайкового мешочка 9 чашки, устанавливается на нулевой отметке шкалы по нулевому индексу 6. Положение относительно шкалы мениска ртути в запаянной верхней трубке, являющееся мерой атмосферного давления, определяется нониусом 2, закрепленным на подвижной муфте 3. Барометр предназначен для проверки инспекторских и стационарных барометров.



Инспекторский ртутный барометр типа ИР состоит из двух параллельных стеклянных трубок, сообщенных нижними концами с заполненным ртутью резервуаром (чашкой), который предназначен для совмещения уровня ртути

Рис. 10. Сифонно-чашечный прибор

в открытой трубке с нулевой отметкой шкалы. Благодаря наличию второго нулевого индекса, инспекторский барометр имеет более широкий диапазон измерений, чем контрольный. Барометр предназначен для проверки рабочих барометрических приборов.

В ртутном манометре абсолютного давления, который также является U-образным манометром, в отличие от предыдущего нулевая отметка расположена в верхней части запаянной откачанной трубки, а отсчет по шкале производится сверху вниз. При измерениях мениск ртути в запаянной трубке совмещается с нулевой отметкой шкалы перемещением в вертикальном направлении заполненного ртутью резервуара, соединенного с трубками шлангом. Положение мениска ртути в трубке, сообщенной с измеряемым абсолютным давлением, отсчитывается визирным кольцом и нониусом. Манометр предназначен для проверки рабочих метеорологических приборов.

Станционные ртутные барометры типов СР-А и СР-Б по принципу действия являются чашечными (см. рис. 4, б) и отличаются друг от друга лишь диапазонами измерений. Барометр СР-А предназначен для проверки апероидных барометров и барографов, а также для измерения атмосферного давления на равнинных метеорологических станциях, в то время как барометр СР-Б — на горных метеорологических станциях (высота от уровня моря до 2000 м). В отличие от вышеуказанных приборов при измерениях атмосферного давления барометрами СР требуется лишь один отсчет.

Ртутные манометры абсолютного давления типа МЧР-3 также относятся к чашечным манометрам и предназначены для проверки барометрических высотомеров и других авиационных приборов. Для повышения производительности поверочных работ приборы снабжены пятью визирными кольцами, которые фиксируются на требуемых отметках шкалы. При проведении проверки давление регулируется так, чтобы мениск ртути в трубке последовательно совмещался с нижней кромкой визирных колец, т. е. манометр МЧР-3 предназначен для работы в режиме датчика давления.

Технические характеристики приборов данной группы приведены в табл. 6.

Таблица 6

| Прибор             | Диапазон измерений, гПа | Погрешность, гПа | Цена деления, гПа |         | Габаритные размеры, мм и масса, кг |
|--------------------|-------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------------------------|
|                    |                         |                  | шкалы             | нониуса |                                    |
| Барометр типа КР   | 950—1090                | ±0,2             | 1                 | 0,05    | φ 56×1150<br>5                     |
| Барометр типа ИР   | 650—1070                | ±0,3             | 1                 | 0,05    | 54×1076<br>4                       |
| Барометр типа СР-А | 810—1070                | ±0,5             | 1                 | 0,10    | 70×920<br>3                        |

| Прибор                                   | Диапазон измерений, гПа | Погрешность, гПа | Цена деления, гПа |         | Габаритные размеры, мм и масса, кг |
|------------------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------------------------|
|                                          |                         |                  | шкалы             | ноннуса |                                    |
| Барометр типа СР-Б                       | 680—1070                | $\pm 0,5$        | 1                 | 0,10    | 70×920<br>3                        |
| Манометр абсолютного давления типа МБП   | 2—1070                  | $\pm 0,5$        | 1                 | 0,05    | 140×285×1310<br>12,5               |
| Манометр абсолютного давления типа МЧР-3 | 5—1070                  | $\pm 1,0$        | 1                 | 0,10    | —                                  |

В показаниях указанных выше приборов вводятся поправки на (см. разд. 2.2): неточности изготовления приборов и градуировки шкалы (инструментальная поправка); отклонение местного ускорения свободного падения от нормального (9,80665 м/с); отклонение температуры шкалы и ртути от их нормальных значений (20 и 0°С соответственно).

Ртутные барометры и манометры предназначены для работы в закрытых помещениях при температуре окружающего воздуха от 10 до 40°С при относительной влажности 80 %. Приборы должны быть защищены от прямого воздействия солнечных лучей и не располагаться вблизи источников тепла.

При дальнейшем увеличении точности измерений должны быть повышены точность отсчета уровней жидкости и сведены к минимуму капиллярные погрешности. Последнее легко достигается в двухчашечных манометрах, в которых за счет достаточно большого внутреннего диаметра чашек капиллярные погрешности практически исключены.

Наиболее распространенным манометром данного типа является компенсационный жидкостный микроманометр типа МКВ-250. Прибор (рис. 11) состоит из двух заполненных наполовину дистиллированной водой чашек 3 и 8, сообщающихся между собой посредством резиновой трубки 5. Чашка 3, выполненная в виде цилиндра с горизонтально расположенной осью, жестко закреплена относительно корпуса 6 прибора с прорезью 10. Чашка 8, представляющая собой цилиндрический сосуд с вертикальной осью, через которую проходит микрометрический винт 9, перемещается по высоте при вращении микрометрического винта с помощью головки 13.

Принцип действия микроманометра заключается в следующем. При равенстве давлений воздуха в обеих чашках по закону сообщающихся сосудов уровни свободных поверхностей воды в чашках располагаются в одной горизонтальной плоскости. В этом положении уровень воды в чашке 3 смещением чашки в вертикальном направлении устанавливается так, чтобы просвет между острием конуса 4 и его видимым отражением от внутренней поверхности воды был минимально возможным (на глаз).

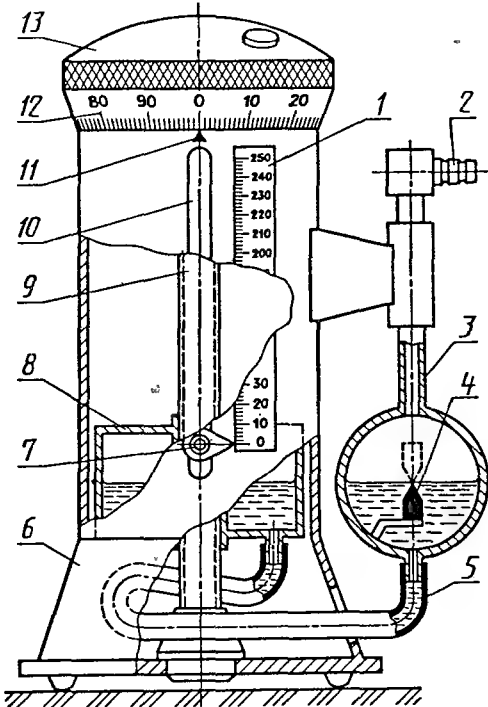


Рис. 11. Компенсационный жидкостный микро-  
манометр типа МКВ-20

Взаимное расположение конуса и его отражение на-  
блюдаются в наклонное  
зеркало и линзу, закреп-  
ленных на торце чашки 3.  
Одновременно указатель,  
смонтированный на штуце-  
ре чашки 8, совмещается  
с нулевой отметкой основ-  
ной шкалы 1.

Если после этого в чаш-  
ку 3 через штуцер 2 будет  
подано избыточное давле-  
ние  $p_1$ , большее чем давле-  
ние  $p_2$  в чашке 8, то уро-  
вень воды в чашке 3 опу-  
снется, и при этом конус 4  
и его отражение сольются.  
Для достижения прежнего  
положения уровня чашка  
8 вращением микрометри-  
ческого винта поднимается  
вверх до тех пор, пока  
столб воды не уравнивает  
разность давлений  $p_1 - p_2$ .  
Высота столба воды опре-  
деляется отсчетами: по по-  
ложению указателя 7 отно-  
сительно основной шкалы  
1 и взаимному расположе-

нию указателя 11 и дополнительной круговой шкалы 12, цена деления  
которой равна одной сотой цены деления основной шкалы (за один обо-  
рот микрометрического винта чашка смещается на 1 мм). Прибор позво-  
ляет измерять как положительную, так и отрицательную разность давле-  
ний и избыточное давление.

Технические характеристики микроманометра МКВ-250: диапазон  
измерений 0—2500 Па (0—250 мм вод.ст.); класс точности 0,02; погреш-  
ность измерений 0,5 Па (0,05 мм вод.ст.); габаритные размеры  
 $\phi 150 \times 300$  мм; масса 3 кг.

На том же принципе двухчашечного манометра основан образцовый  
компенсационный микроманометр (типа МКМ) 1-го разряда, в котором  
в отличие от предыдущего с целью повышения точности измерений высо-  
та столба воды определяется концевыми мерами длины и стрелочным  
индикатором часового типа, что позволяет исключить погрешности изго-  
товления микрометрического винта. Микроманометр позволяет изме-  
рять разность давлений в диапазоне 100—4000 Па (10—400 мм вод.ст.)  
с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,2$  Па (0,02 мм вод.ст.). Еще более

высокая точность измерений достигнута в эталонных микроманометрах данного типа.

Помимо указанного, двухчашечные манометры нашли применение в качестве портативных переносных приборов. Так, серийно выпускается переносной мановакуумметр типа ППР-2М, предназначенный для проверки дифманометров — расходомеров, манометров, вакуумметров, тягомеров и напорометров. Прибор содержит две пары соединенных дюрритовыми шлангами чашек, одна из которых заполнена водой, а другая ртутью. Неподвижные чашки смонтированы на основании прибора, а одна из подвижных, в зависимости от требуемого диапазона измерений — на каретке с нониусом, перемещающейся вдоль металлической шкалы. Уровень жидкости в подвижной чашке фиксируется конусным наконечником микрометрического винта, что позволяет определять отклонения высоты столба жидкости от целых делений шкалы, т. е. по способу отсчета прибор близок микроманометру МКВ. Шкала прибора выполнена разборной, что делает возможной его транспортировку в двух компактных футлярах.

Прибор ППР-2М имеет следующие технические характеристики: диапазон измерений  $0-1,33 \cdot 10^3$  гПа для ртути,  $0-98$  гПа для воды или от 0 до 1000 мм столба жидкости; относительная погрешность измерений 0,3 %; габаритные размеры прибора в собранном виде  $250 \times 200 \times 1135$ ; масса не более 9 кг.

## 2.4. Жидкостно-поршневые манометры

Очень часто к жидкостным манометрам относят приборы, измерительная система которых хотя и содержит в качестве одного из элементов жидкость, но по принципу действия в корне отличается от жидкостных манометров. К таким приборам относится дифференциальный манометр типа „кольцевые весы” (рис. 12), состоящий из тороидального корпуса 1, внутренняя полость которого в верхней части разделена перегородкой 2, а нижняя часть до половины заполнена жидкостью 4. Таким образом, корпус имеет две измерительные камеры А и Б, в которые через гибкие шланги подаются измеряемые давления  $p_1$  и  $p_2$ . Корпус может поворачиваться относительно опоры 3, расположенной в его геометрическом центре. К нижней части корпуса прикреплен противовес 5.

При равенстве давлений в камерах А и Б корпус прибора располагается в соответствии с рис. 12, а. Если одно из давлений больше другого, например,  $p_1 > p_2$ , то под действием разности давлений  $\Delta p = p_1 - p_2$ , действующей на перегородку, корпус повернется на определенный угол  $\alpha$ , а уровни жидкости внутри корпуса займут положения, соответствующие рис. 12, б. При этом уравнения равновесия измерительной системы принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \Delta p \cdot F \cdot R_1 &= m \cdot g \cdot R_2 \cdot \sin \alpha, \\ \Delta p &= H \cdot \rho \cdot g, \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$



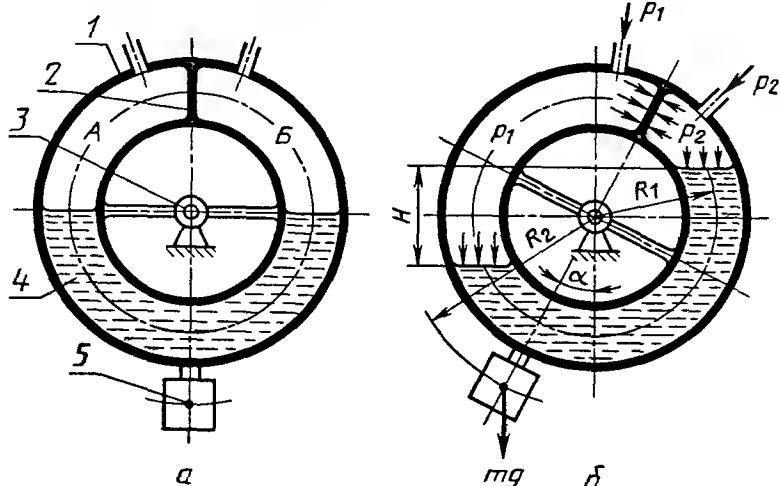


Рис. 12. Дифференциальный манометр типа „Кольцевые веса”

где  $F$  — площадь перегородки (внутренняя площадь поперечного сечения тороида);  $R_1$  — средний радиус тороида;  $R_2$  — расстояние от оси вращения до центра тяжести противовеса;  $m$  — масса противовеса;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\alpha$  — угол поворота корпуса.

Принимая во внимание, что на стенки корпуса давление действует перпендикулярно к поверхности, т. е. вызываемые этим силы направлены к оси вращения корпуса и не могут создать момента вращения, уравнение измерений принимает вид

$$\Delta p = \frac{m \cdot g}{F} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \sin \alpha. \quad (2.24)$$

Таким образом, давление определяется массой противовеса, геометрическими параметрами прибора и углом поворота корпуса, а роль заполняющей измерительную систему жидкости сводится к созданию жидкостного затвора между камерами А и Б. Поэтому по виду первичного преобразования — давления в силу, действующую на перегородку, — прибор аналогичен поршневым манометрам.

Еще в большей мере сказанное относится к колокольным манометрам, применяемым в качестве образцовых и эталонных приборов. Основные элементы измерительной системы манометра (рис. 13): наполовину заполненный водой сосуд 5, цилиндрический колокол 3, подвеска 2 с чашкой 6 для наложения грузов 7, рычаг 1 весового компаратора с указателем положения равновесия 8 и подвески 9 с тарировочным грузом 10. Измеряемое давление подводится под колокол трубкой 4.

Измерительной камерой прибора является внутренняя полость колокола, ограниченная дном и внутренней поверхностью цилиндрической

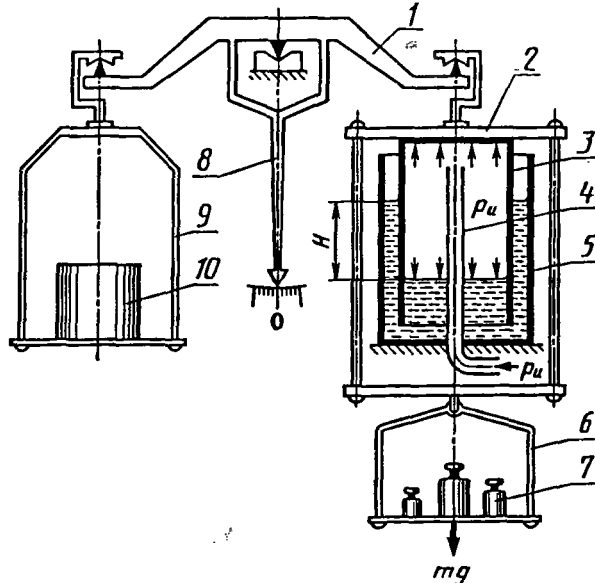


Рис. 13. Измерительная система манометра

части колокола и свободной поверхностью жидкости в его нижней части. При проведении измерений камера предварительно сообщается с атмосферным давлением и вес частично погруженного в жидкость колокола уравнивается тарировочным грузом 10. Тогда при подаче в камеру измеряемого давления для сохранения положения равновесия на чашку 6 необходимо наложить грузы 7, вес которых и является мерой измеряемого давления. При этом давление в камере будет уравниваться противодействием столба жидкости в кольцевом зазоре между наружной поверхностью колокола и внутренней поверхностью сосуда 5. Таким образом, роль жидкости так же, как и в вышеописанном приборе, ограничивается созданием жидкостного затвора для удержания давления в измерительной камере, так как составляющими сил давления на боковую поверхность колокола в вертикальном направлении при условии соблюдения технологии его изготовления можно пренебречь.

Уравнение измерений колокольного манометра имеет вид

$$p_{\text{и}} = \frac{m \cdot g}{F} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right), \quad (2.25)$$

где  $p_{\text{и}}$  — избыточное давление внутри камеры;  $m$  — масса грузов, необходимая для уравнивания давления;  $g$  — ускорение свободного падения;  $F$  — площадь дна колокола;  $\rho_{\text{в}}$  и  $\rho$  — плотность воздуха и материала грузов, соответственно.

Уравнение (2.25) по своей структуре полностью соответствует уравнению измерений грузопоршневых манометров. Указанное нашло отражение в наименовании рассматриваемой группы приборов — „жидкостно-поршневые манометры”. С другой стороны, согласно (2.25) кольцевой манометр может быть аттестован поэлементным фундаментальным методом. Поэтому в нашей стране и за рубежом на их основе созданы государственные эталоны в области микроманометрии, которые аттестуются по результатам измерения массы, ускорения и площади, т. е. в конечном итоге сводятся к единицам основных физических величин — массе, длине, времени.

### Контрольный вопрос № 3

Влияют ли изменения плотности затворной жидкости, за-  
полняющей манометр типа „кольцевые весы”, на их показания  
при измерении давления?

Если „да” — см. с. 39, если „нет” — см. с. 41.

## 2.5. Перспективы развития жидкостных манометров

По мере развития науки и техники и дальнейшего совершенствования деформационных манометров и измерительных преобразователей давления различных типов применение жидкостных манометров при технических измерениях в народном хозяйстве страны будет все более и более ограничиваться. Однако благодаря фундаментальности принципа действия и высокой стабильности показаний жидкостных манометров во времени перспективность их применения в качестве образцовых и эталонных приборов в барометрии (до 100—150 кПа) и в микроманометрии (до 2,5—4 кПа) не вызывает сомнений.

В первую очередь, развитие жидкостных манометров будет идти в направлении повышения точности, автоматизации процесса измерений и введения поправок в показания приборов.

Как показано в разд. 2.2, погрешности жидкостных манометров, в основном, определяются погрешностями измерения высоты столба жидкости, ее плотности и ускорения свободного падения в месте измерений. Последнее, впрочем, всегда может быть определено с необходимой точностью. Современные средства измерений позволяют определить ускорение свободного падения с погрешностью менее  $1 \cdot 10^{-4}$  м/с<sup>2</sup> (0,001 %), а в необходимых случаях и точнее (до 0,0001 %), чем можно пренебречь.

Точность определения плотности жидкости во многом зависит от ее физических свойств. Наиболее достоверно известна плотность ртути и дистиллированной воды. Так, плотность ртути при  $t = 0^\circ\text{C}$  принимается равной  $1,35951 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>. Погрешность принятого значения не превышает  $5 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>, т. е. менее 0,0005 %. При этом ртуть должна быть подвергнута тщательной дистилляции. С такой же точностью изучено влияние температуры. Отсюда погрешность определения плотности ртути может быть доведена до значения менее 0,001 %. Примерно такой же

уровень точности достигнут и для дистиллированной воды. Однако ее плотность существенно зависит от растворенных примесей. Следует отметить, что указанная точность требует при введении температурной поправки измерять среднюю температуру столба жидкости с погрешностью  $0,025^{\circ}\text{C}$ .

Существенное влияние на точность жидкостных манометров оказывают погрешности определения высоты столба жидкости. Например, если указанную составляющую погрешности принять равной  $0,001\%$ , то столб жидкости высотой  $1000\text{ мм}$  должен быть измерен с погрешностью  $0,01\text{ мм}$ , что достигается в настоящее время только на уровне эталонных барометров и микроманометров.

Таким образом, суммарная погрешность современных эталонных жидкостных манометров составляет не более  $0,005\%$  и в некоторых случаях может быть снижена до  $0,001\%$ . Но при этом должны выполняться следующие рекомендации.

1. Измерения высоты столба жидкости следует выполнять интерференционными методами, обладающими наивысшей точностью (погрешность измерений  $0,001\text{ мм}$  и менее).

2. По принципу действия наиболее предпочтительны двухчашечные манометры, в которых уровни жидкости в каждой из чашек фиксируются емкостным методом с погрешностью менее  $0,001\text{ мм}$ .

3. Обеспечение равномерности температуры столба жидкости по высоте и ее стабильности во времени измерений с допускаемыми отклонениями не более  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ .

4. Измерительная система манометра должна быть заполнена инертным газом с известными физическими свойствами (плотность, коэффициент преломления, диэлектрическая постоянная и др.), обеспечивающими необходимую точность измерений. Предпочтительно применение сухого газообразного азота высшей очистки.

5. Сложность процесса измерений, связанная с необходимостью введения в показания манометра многочисленных поправок, требует применения средств контроля влияющих факторов и их учета в результатах на базе микроэлектроники.

### **К контрольному вопросу № 3**

Вы не разобрались в принципе действия кольцевых весов. Вам необходимо еще раз внимательно прочитать разд. 2.4. При этом следует обратить внимание на принципиальное отличие кольцевых весов и колокольных манометров от жидкостных манометров, которое состоит в том, что мерой давления в манометрах этих типов является не высота столба жидкости, а сила, возникающая под действием давления на перегородку кольцевых весов или на дно колокола.

Пути создания эталонов этого типа можно проиллюстрировать на примере первичного эталона давления Национального Бюро метрологии (Франция), разработанного в Национальном институте метрологии (Париж). Эталон (рис. 14) представляет собой двухчашечный ртутный ма-

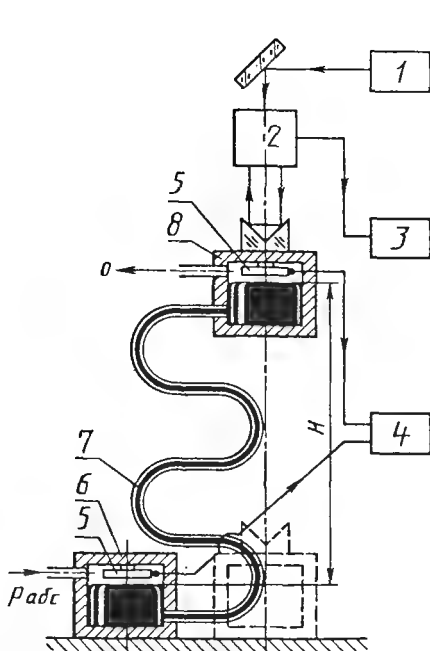


Рис. 14. Первичный эталон давления Франции

и свободными поверхностями ртути в чашках 6 и 8. При этом высота ртутного столба пропорциональна числу интерференционных полос, отсчитанных счетчиком 3 при перемещении чашки 8 из нулевого положения в положение равновесия, т. е.

$$H = \frac{N \cdot \lambda_1}{2n}, \quad (2.26)$$

где  $N$  — число полос;  $\lambda_1$  — длина волны монохроматического света;  $n$  — показатель преломления воздуха.

При создании эталона предпринято все необходимое для учета возможных погрешностей и сведения их к минимуму: термостатирование измерительной системы манометра с допускаемыми отклонениями  $\pm 0,025^\circ\text{C}$ , автоматизация наиболее трудоемких работ при проведении измерений, размещение пульта управления и вспомогательного оборудования в отдельном помещении и пр.

По данным Национального Бюро метрологии первичный эталон позволяет измерять абсолютное давление в диапазоне от 1 до 100 кПа с погрешностью (в паскалях)  $\Delta p \leq 5 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,1$ , что соответствует относительной погрешности  $\delta_p \leq 6 \cdot 10^{-6}$  (0,0006 %) при измерении давления  $p = 100$  кПа. Основная часть погрешности приходится на не-

номер, в котором неподвижная 6 и подвижная 8 чашки сообщаются между собой с помощью гибкого шланга 7. В обеих чашках в верхней части смонтированы электроды 5. Если в неподвижную чашку 6 подано абсолютное давление  $p_{\text{абс}}$ , а подвижная чашка 5 откачана, то для уравнивания давления последняя должна быть поднята вверх на высоту  $H$ , которая и является мерой давления. Высота ртутного столба  $H$  определяется по перемещению чашки 8 из нулевого положения (на схеме показано пунктиром) с помощью интерферометра типа Микельсона 2, который питается монохроматическим светом от гелий-неонового лазера 1. Идентичность высоты ртутного столба перемещению чашки 8 определяется по сбалансированности емкостного моста 4, плечи которого образуют электрические емкости между электродами 5 и

определенность определения значения плотности ртути ( $\delta_p \leq 4 \cdot 10^{-6}$ ), в то время как погрешность измерения высоты ртутного столба составляет  $\delta_H \leq 1 \cdot 10^{-6}$ . Поэтому основной резерв повышения точности эталонных ртутных манометров состоит в снижении погрешностей определения плотности ртути, что, однако, представляет весьма сложную научно-техническую задачу, решение которой требует больших затрат и продолжительного времени. Реально достижимую точность в ближайшие годы можно оценить погрешностью измерения давления  $\delta_p = (4-6) \times 10^{-6}$ . При этом следует отметить, что воспроизводимость измерений существенно выше. Случайные погрешности могут быть сведены к значениям  $S = (1-2) \cdot 10^{-6}$ , что является основанием для создания в ведущих метрологических центрах мира столь сложных и дорогих эталонных комплексов.

Дальнейшее совершенствование образцовых жидкостных манометров с погрешностями 0,01–0,05 % и более, за исключением области микроманометрии, не столь актуально. Уже в настоящее время указанный уровень точности достигнут образцовыми грузопоршневыми и деформационными манометрами, а их дальнейшее совершенствование приведет к полному вытеснению жидкостных манометров из поверочной практики. При технических измерениях это произошло значительно раньше.

### К контрольному вопросу № 3

Вы правильно ответили на вопрос. На показания кольцевых весов не влияют не только изменения плотности затворной жидкости, но и сама плотность, так как давление жидкости всегда действует перпендикулярно к ограничивающим ее поверхностям и поэтому не может создать момента сил относительно оси вращения кольцевых весов.

## Глава 3. ПОРШНЕВЫЕ МАНОМЕТРЫ

Поршневые манометры появились позже жидкостных. Впервые поршневой манометр был применен для измерения давления в 1833 г. Парротом и Ленцем (Российская Академия наук) при изучении сжимаемости воздуха и других свойств газов, причем значение давления для того времени было очень большим (10 МПа). Однако, в принципе, открытие поршневого метода могло бы произойти значительно раньше. Если О. Герике в своем опыте с откачанными „магдебургскими полушариями“ довел число лошадей в каждой упряжке до количества, необходимого для разъединения полушарий, то он смог бы определить атмосферное давление в „лошадиных силах“ на площадь поперечного сечения шара еще в 1652 г.

Широкое распространение поршневые манометры получили благодаря Амага (Франция) и Рухгольцу (Германия), и особенно последнему, который в 1883 г. организовал промышленный выпуск этих приборов. Дальнейшее развитие поршневой манометрии шло, в основном, в сторону увеличения точности и верхних пределов измерений, а начиная с тридцатых годов текущего столетия поршневые манометры стали вытеснять жидкостные и при точных измерениях давлений, близких к атмосферному давлению.

Большой вклад в развитие поршневой манометрии внесли проф. М.К. Жоховский, который впервые разработал целостную теорию приборов с неуплотненным поршнем, П.В. Индрик, В.Н. Граменицкий и многие другие их последователи.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом поршневые манометры играют ведущую роль при поверке и испытаниях манометрических приборов в широком диапазоне давлений от 1 кПа до десятков тысяч МПа и находят все большее применение в качестве национальных государственных эталонов давления.

### 3.1. Принцип действия, основы теории и типы поршневых манометров

На рис. 15 изображен простейший поршневой манометр, который состоит из цилиндрического поршня 1, притертого к цилиндру 2 с минимально возможным зазором. Если на нижний торец поршня действует измеряемое давление  $p$ , то для его уравнивания к поршню должна быть приложена сила  $P$ . Уравнение равновесия с учетом силы трения на боковую поверхность поршня, возникшей при протекании жидкости или газа через зазор между поршнем и цилиндром под действием измеряемого давления, имеет вид

$$pF = P - T, \quad (3.1)$$

где  $F$  — геометрическая площадь поперечного сечения поршня;  $T$  — сила жидкостного трения на боковую поверхность поршня.

После преобразований уравнение (3.1) приводится к виду

$$p = \frac{P}{F + \frac{T}{p}}, \quad (3.2)$$

где  $F + T/p = F_{\text{эф}}$  — эффективная (приведенная) площадь поршня.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что сила жидкостного трения  $T$  пропорциональна действующему давлению. Поэтому эффективная площадь не зависит от давления, а следовательно, измеряемое давление прямо пропорционально уравнивающей его силе. Здесь не принимаются во внимание деформации поршня и цилиндра, которые необходимо учитывать при измерении высоких давлений.

Наиболее часто измеряемое давление уравнивают весом грузов, что явно предпочтительно с точки зрения достижения высокой точности измерений, хотя и представляет известные неудобства в эксплуатации. Уравнение измерений (3.2) поршневого манометра в этом случае принимает вид

$$p = \frac{m \cdot g}{F_{\text{эф}}}, \quad (3.3)$$

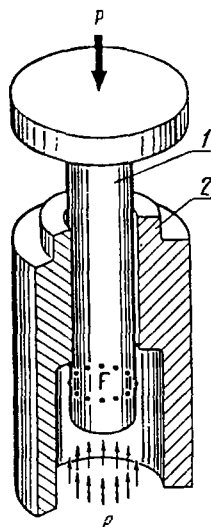


Рис. 15. Простейший поршневой манометр

где  $m$  — масса грузов и поршня;  $g$  — ускорение свободного падения.

Благодаря высокой стабильности эффективной площади, которая определяется в основном геометрическими размерами пары поршень—цилиндр, а также возможности учета внешних влияний расчетными методами, поршневые манометры являются идеальными преобразователями давления в силу.

Наиболее существенное достоинство поршневых манометров состоит в том, что они непосредственно воспроизводят давление по определению: давление равно силе, деленной на площадь поршня. Этот метод так же, как и метод уравнивания давления столбом жидкости, является фундаментальным, т. е. измерение давления в конечном итоге сводится к измерению массы, длины и времени. Вышеизложенное позволяет сформулировать следующее определение.

**Поршневой манометр** — манометр, в котором действующее на поршень измеряемое давление преобразуется в силу и определяется по значению силы, необходимой для ее уравнивания. В наиболее распространенных поршневых манометрах давление уравнивается весом грузов. Такие манометры называются грузопоршневыми.

Уравнения (3.2) и (3.3) по своей структуре идентичны уравнениям измерений жидкостно-поршневых манометров (2.24) и (2.25). Действительно, в обоих случаях давление определяется по уравнивающей его силе и площади твердой поверхности. Однако, между ними имеются существенные различия. Одно из обязательных условий, обеспечивающих возможность выполнения измерения — сохранение постоянства измеряемого давления при его измерении. В жидкостно-поршневых манометрах это достигается уравниванием измеряемого давления гидростатическим давлением столба жидкости. Например, в колокольном манометре столб образуется в кольцевом пространстве между боковыми поверхностями колокола и сосуда, в которой залита разделительная жидкость (гидростатический затвор). В отличие от этого в поршневых манометрах постоянство давления в измерительной камере поддерживается благодаря гидравлическому сопротивлению протекания жидкости через зазор между поршнем и цилиндром (гидродинамический затвор). При этом ввиду малости зазора (1–2 мкм) гидравлическое сопротивление позволяет поддерживать постоянство давления с допускаемыми отклонениями. Не обеспечивая полную герметичность, гидродинамический затвор обладает очень важным преимуществом — измеряемое давление практически не влияет на размеры прибора, в то время как во всех жидкостных манометрах высота столба жидкости, необходимая для уравнивания, прямо пропорциональна измеряемому давлению.

Для обеспечения чисто жидкостного трения в зазоре поршневой пары поршень вращают вокруг его оси относительно цилиндра или, наоборот, цилиндр вращают относительно поршня. Благодаря этому возникает эффект „гидравлического клина“, на котором основана работа любого подшипника скольжения. При этом ось поршня центрируется относительно оси цилиндра, что предотвращает непосредственный контакт между поверхностями поршня и цилиндра, а следовательно, и возможность



возникновения „сухого” жидкостного трения и связанные с ним дополнительные погрешности.

Рассмотрим более подробно основные теоретические закономерности, связывающие метрологические и эксплуатационные характеристики поршневых манометров с геометрическими параметрами поршневых пар и физическими свойствами измерительной системы (рис. 16).

Согласно теории сила жидкостного трения, действующая на боковую поверхность поршня вдоль его оси  $T = \pi r h p (1 + h/r)$ , или, принимая во внимание, что  $h/r \ll 1$  и вторым членом в скобках можно пренебречь,

$$T = \pi r h \cdot p. \quad (3.4)$$

Тогда, подставляя значение  $T$  в выражение для эффективной площади поршня (2.32), получим

$$F_{\text{эф}} = \pi r^2 + \pi r h, \quad (3.5)$$

где  $r$  — радиус поршня;  $h = R - r$  — радиальный зазор между поршнем и цилиндром;  $R$  — радиус цилиндра.

Эффективная площадь поршня  $F_{\text{эф}}$  является основным параметром поршневого манометра.

Как видно из (3.4), сила жидкостного трения не зависит от вязкости протекающей через зазор жидкости и длины зазора  $l$  и пропорциональна измеряемому давлению. Поэтому эффективная площадь поршня (3.5), равная полусумме геометрических площадей поршня и цилиндра, определяется только геометрическими размерами поршневой пары  $R$  и  $r$  и не зависит от физических свойств рабочей жидкости и измеряемого давления, если последнее не настолько велико, чтобы существенно деформировать поршневую пару.

При умеренных давлениях (менее 10 МПа) деформациями поршневой пары в большинстве случаев можно пренебречь. Поэтому можно принять, что эффективная площадь поршня постоянна во всем диапазоне измерений, а следовательно сила, необходимая для уравнивания давления, прямо пропорциональна измеряемому давлению:  $P = F_{\text{эф}} \cdot p$ .

В этом состоит одно из важнейших достоинств поршневых манометров. Изменения эффективной площади поршня при больших давлениях относительно малы и легко учитываются расчетными поправками.

Основные эксплуатационные характеристики — утечка рабочей жидкости через зазор поршневой пары и продолжительность свободного вращения поршня по инерции.

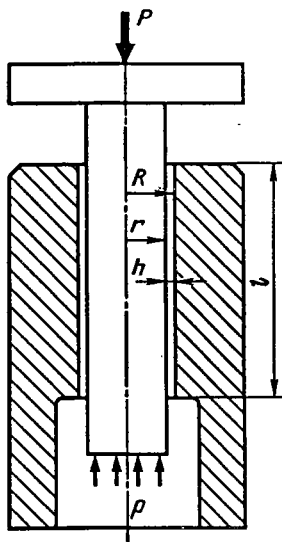


Рис. 16. Связь метрологических и эксплуатационных характеристик поршневых манометров с геометрическими параметрами поршневых пар и физическими свойствами измерительной системы

Расход жидкости через зазор поршневой пары, который существует при проведении измерений, определяется уравнением

$$Q = \frac{\pi r h^3 \cdot p}{6\mu l}, \quad (3.6)$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость рабочей жидкости;  $l$  — длина зазора между поршнем и цилиндром, остальные обозначения прежние.

Как видно из (3.6), наиболее эффективно расход жидкости может быть уменьшен путем уменьшения зазора  $h$  и увеличения вязкости рабочей жидкости  $\mu$ .

В идеальном случае было бы желательно изготавливать поршневые пары с зазором  $h$ , близким к нулю, когда утечка жидкости практически отсутствует, но это технологически неосуществимо. Как показала практика применения и изготовления образцовых поршневых манометров, оптимальный зазор составляет 1–3 мкм. (Для сравнения напомним, что размеры средней бактерии составляют 5–6 мкм и, если бы она не была эластичной, то не смогла бы проникнуть в такой зазор). При этом в зависимости от диапазона измерений применяют рабочие жидкости различной вязкости. Например, при измерении избыточных давлений не более 150–250 кПа в качестве рабочей жидкости применяется керосин ( $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$  Па·с), а при измерении давления до 1000–2000 МПа — касторовое масло ( $\mu = 1$  Па·с). Таким образом, влияние увеличения давления на утечку во многом компенсируется увеличением вязкости рабочей жидкости. При этом, как правило, существенно уменьшают радиус поршня, что делает утечку жидкости практически постоянной.

Если давление жидкости измеряется в замкнутом объеме, то по мере утечки жидкости происходит ее замещение путем опускания поршня и благодаря этому давление уменьшается очень мало. Учитывая (3.6), скорость опускания поршня

$$v = \frac{Q}{\pi r^2} = \frac{h^3 p}{6\mu l r}. \quad (3.7)$$

Размеры поршневой пары  $h$ ,  $r$ ,  $l$  и вязкость рабочей жидкости  $\mu$  выбирают так, чтобы при заданном давлении скорость опускания обеспечивала возможность произвести измерение в положении поршня, близком к расчетному уровню. По скорости опускания поршня контролируют также зазор между поршнем и цилиндром. Согласно (3.7) зазор

$$h = \sqrt[3]{\frac{6\mu l r \cdot v}{p}}. \quad (3.8)$$

Обеспечивая в большинстве случаев необходимую точность измерений, этот способ выгодно отличается от определения зазора по результатам измерений радиусов поршня и цилиндра благодаря предельной простоте его реализации.

Одна из важных характеристик поршневого манометра — продолжительность свободного вращения поршня, которая определяется кривой

уменьшения скорости вращения во времени. Указанная закономерность имеет вид

$$\omega = \omega_0 \cdot e^{-\epsilon t}, \quad (3.9)$$

$$\epsilon = \frac{2\pi r^3 \cdot l \cdot \mu}{J \cdot h},$$

где  $\omega_0$  — начальная угловая скорость вращения поршня;  $\omega$  — угловая скорость вращения поршня в момент времени;  $J$  — момент инерции поршня и наложенных на него грузов. Остальные обозначения прежние.

#### Контрольный вопрос № 4

Влияет ли вязкость жидкости, протекающей под действием давления через зазор между поршнем и цилиндром, на эффективную площадь поршня?

Если „да” — см. с. 47, если „нет” — см. с. 50.

Как видно из (3.9), скорость вращения поршня уменьшается тем медленнее, чем меньше вязкость рабочей жидкости и размеры поршня  $r$  и  $l$  и чем больше момент инерции поршня с грузами и зазор  $h$ . Следует отметить, что при выборе оптимальных размеров поршневой пары необходимо учитывать их влияние на утечки жидкости через зазор (3.6).

Измерительные системы поршневых манометров могут быть классифицированы по различным признакам: форме и конструкции поршневых пар, уравновешенности собственного веса поршня и способам его уравновешивания, видам измеряемой среды, способам уравновешивания измеряемого давления, назначению поршневого манометра, виду измеряемого давления и пр.

Основные конструктивные формы цилиндрических поршневых пар, представленные на рис. 17, позволяют осуществить преобразование измеряемого давления в силу или в давление другого назначения. Функциональные возможности указанных поршневых пар, наиболее часто реализуемые в поршневых манометрах, отражены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

| Форма поршневой пары                                | Вид преобразования измеряемого давления                                                       | Условия измерений                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Простая одноступенчатая поршневая пара (рис. 17, а) | Измеряемое избыточное давление преобразуется в силу $P = p_{\text{и}} \cdot F$                | Давление над верхним торцом 2 поршня равно атмосферному давлению; измеряемое избыточное давление $p_{\text{и}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}}$ ; ( $p_{\text{абс}} > p_{\text{атм}}$ ) действует на нижний торец 1 поршня                |
| То же                                               | Измеряемое избыточное отрицательное давление преобразуется в силу $P = -p_{\text{и}} \cdot F$ | Давление под нижним торцом 1 поршня равно атмосферному давлению; измеряемое отрицательное избыточное давление $p_{\text{и}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}}$ ( $p_{\text{абс}} < p_{\text{атм}}$ ), создается над верхним торцом 2 поршня |

| Форма поршневой пары                                                                                                             | Вид преобразования измеряемого давления                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Условия измерений                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Простая одноступенчатая поршневая пара (рис. 17, а)</p> <p>Двухступенчатая (дифференциальная) поршневая пара (рис. 17, б)</p> | <p>Измеряемое абсолютное давление преобразуется в силу <math>P = p_{абс} \cdot F</math></p> <p>Измеряемое избыточное давление преобразуется в силу следующими способами:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) <math>P_1 = p_H \cdot F_1</math>;</li> <li>2) <math>P_2 = p_H (F_2 - F_1)</math>;</li> <li>3) <math>P_3 = p_H \cdot F_2</math></li> </ol> | <p>Над верхним торцом 2 поршня создается вакуум (<math>p_{абс} = 0</math>), измеряемое абсолютное давление действует на нижний торец 1 поршня</p> <p>Давление над верхним торцом 3 поршня равно атмосферному давлению; измеряемое избыточное давление действует на:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) нижний торец 1 поршня (штуцер 2 открыт на атмосферу);</li> <li>2) кольцевую площадь штуцера 2 поршня (на нижний торец 1 поршня действует атмосферное давление);</li> <li>3) нижний торец 1 поршня и на кольцевую площадь штуцера 2 (одновременно)</li> </ol> |
| То же                                                                                                                            | <p>Многократное уменьшение измеряемого давления:</p> $p_3 = \frac{F_1}{F_2} \cdot p_H$                                                                                                                                                                                                                                                                           | Измеряемое давление действует на нижний торец 1 поршня, кольцевая площадь 2 сообщена с атмосферным давлением                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| „ „                                                                                                                              | <p>Многократное увеличение измеряемого давления:</p> $p_1 = \frac{F_2}{F_1} \cdot p_H$                                                                                                                                                                                                                                                                           | Измеряемое давление действует на верхний торец 3 поршня, кольцевая площадь штуцера 2 сообщена с атмосферным давлением                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Трехступенчатая (двойная дифференциальная) поршневая пара (рис. 17, в)                                                           | <p>Измеряемое абсолютное давление преобразуется в силу <math>P = p_{абс} \times (F_2 - F_1) - p_{атм} \times (F_2 - F_3) - p_{остм} \times (F_3 - F_1)</math></p> <p>При <math>p_{атм} = 0</math>; <math>F_1 = F_3</math>, <math>P = p_{абс} \cdot (F_2 - F_1)</math></p>                                                                                        | <p>Давления под нижним торцом 1 и над верхним торцом 4 поршня равны атмосферному давлению; камера 3 откачивается и в камеру 2 подается абсолютное давление <math>p_{абс}</math>. При сообщении камеры 3 с атмосферным давлением измеряется избыточное давление, при сообщении с атмосферным давлением камеры 2 в камере 3 измеряется отрицательное избыточное давление</p>                                                                                                                                                                                                     |
| То же                                                                                                                            | <p>Измеряемая разность давлений преобразуется в избыточное давление</p> $p_H = (p_3 - p_2) \times (F_2 - F_1)$ <p>При <math>F_1 = F_3</math></p>                                                                                                                                                                                                                 | <p>Давление над верхним торцом 4 равно атмосферному давлению; в камеру 3 подается давление <math>p_3</math>; в камеру 2 — <math>p_{абс}</math>, на нижний торец 1 поршня действует избыточное давление <math>p_H</math></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Различные формы поршневых пар при их применении в поршневых манометрах для измерения различных видов давления имеют свои преимущества и недостатки.

#### К контрольному вопросу № 4

Вам следует более внимательно просмотреть разд. 3.1. При этом особое внимание следует обратить на формулы (3.4) и (3.6). Согласно (3.6) при увеличении вязкости уменьшается расход жидкости через зазор. Поэтому сила трения (3.4) и эффективная площадь (3.5) остаются постоянными.

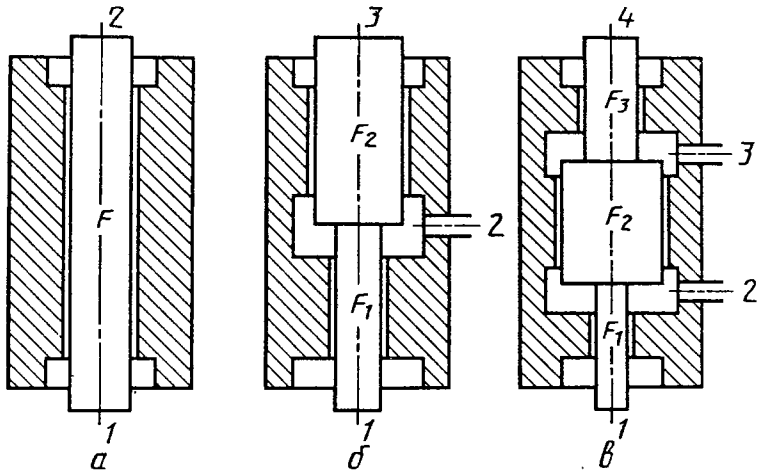


Рис. 17. Формы цилиндрических поршневых пар

При измерении избыточного давления наиболее предпочтительны одноступенчатые поршневые пары (рис. 17, а), которые обеспечивают максимальную конструктивную простоту манометров и технологичность их изготовления. При этом масса грузов, которые, как правило, применяются для уравнивания измеряемого давления, при измерении избыточного давления ( $p_{\text{абс}} > p_{\text{атм}}$ ) прилагается непосредственно к верхнему торцу 2 поршня; а при измерении отрицательного избыточного давления ( $p_{\text{абс}} < p_{\text{атм}}$ ) — к нижнему торцу 1 поршня.

#### Контрольный вопрос № 5

Вы располагаете двумя поршневыми манометрами, один из которых имеет эффективную площадь  $F = 0,05 \text{ см}^2$ , а другой —  $F = 1 \text{ см}^2$ . Какой из указанных манометров следует, по Вашему мнению, применить при измерении давления до 60 МПа;  $F = 0,05 \text{ см}^2$  или  $F = 1 \text{ см}^2$ ?

Если Вы считаете, что  $F = 0,05 \text{ см}^2$ , то откройте с. 50, если  $F = 1 \text{ см}^2$  — см. с. 52.

При измерении абсолютного давления и разности применение одноступенчатой поршневой пары приводит к существенному усложнению конструкции поршневого манометра и методики выполнения измерений. Так, при измерении абсолютного давления пространство над верхним торцом 2 поршня должно быть вакуумировано, что приводит к необходимости герметизации верхней части прибора, а это существенно усложняет процесс наложения уравнивающих грузов при измерении давления. В данном случае более предпочтительно применение трехступенчатой поршневой пары (рис. 17, в), которая позволяет подводить измеря-

емое и опорное давление непосредственно в замкнутые измерительные камеры 2 и 3. При этом обеспечивается свободный доступ к верхнему торцу 4 поршня при наложении уравнивающих грузов.

Двухступенчатые (дифференциальные) поршневые пары (рис. 17, б) наиболее часто применяются для многократного уменьшения измеряемого давления при измерении высоких избыточных давлений или увеличения измеряемого давления при измерении низких давлений. Такие преобразователи входят в состав измерительных систем (рис. 18) поршневых манометров, применяемых для измерения низких или высоких избыточных давлений.

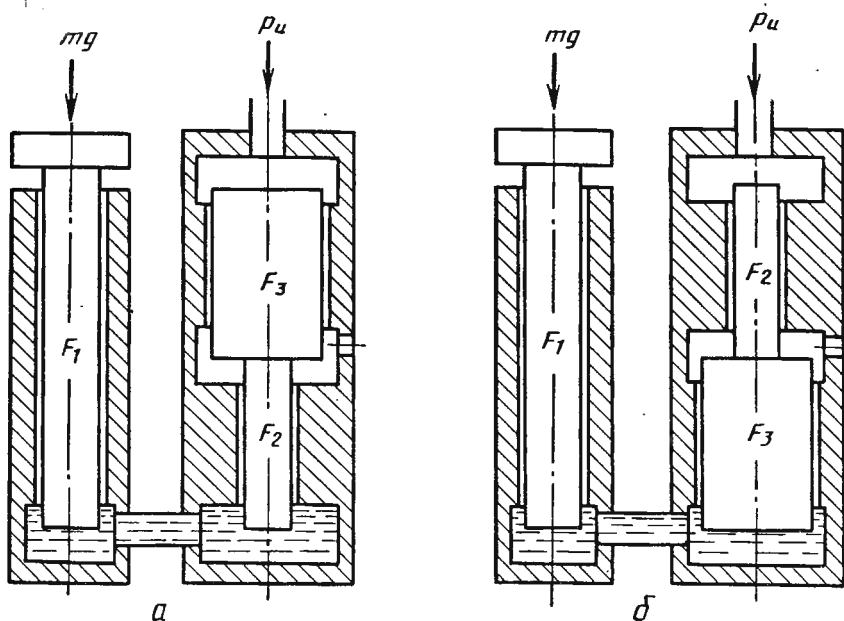


Рис. 18. Измерительные системы поршневых манометров

В поршневой системе для измерения низких избыточных давлений (рис. 18, а) последнее предварительно двухступенчатой поршневой парой увеличивается в отношении площадей  $F_3/F_2$  до давления  $p_1 = p_u \cdot F_3/F_2$ , которое затем измеряется простым одноступенчатым грузопоршневым манометром. При этом измеряемое избыточное давление

$$p_u = \frac{mg}{F_1} \cdot \frac{F_2}{F_3}, \quad (3.10)$$

где отношение площадей обычно составляет 1:10 или 1:100 в зависимости от измеряемого низкого давления.

Поршневая система (рис. 18, б) позволяет, наоборот измерять высокие давления с помощью простых одноступенчатых поршневых маномет-

ров, применяемых при измерении средних давлений. В данном случае измеряемое давление

$$p_{\text{и}} = \frac{mg}{F_1} \cdot \frac{F_3}{F_2} \tag{3.11}$$

Этот способ имеет существенные преимущества по сравнению с измерением высоких давлений с помощью простой поршневой пары, так как не требует чрезмерного уменьшения площади поршня  $F_1$  при одновременном увеличении массы грузов  $m$ . Существенно уменьшаются также и габаритные размеры поршневого манометра.

Одним из важнейших преимуществ указанных поршневых систем, особенно при измерении низких давлений, является возможность взаимного уравнивания собственного веса поршней, что позволяет довести нижний предел измерений до нуля, а вместе с тем и провести контроль ряда метрологических характеристик при отсутствии давления. Поэтому принцип предварительного уравнивания собственного веса поршня находит все большее применение.

Помимо указанного выше, применяются также способы предварительного уравнивания собственного веса поршня рычажным противовесом, давлением столба жидкости, пружинным механизмом и др. Примеры конструктивного исполнения различных способов уравнивания веса поршня, а также способов приложения к поршню уравнивающего измеряемое давление усилия, приводятся в разд. 3.3.

**К контрольному вопросу № 4**

Ваш вывод правилен. В то же время не забывайте, что при высоких давлениях, когда появляются существенные деформации поршня и цилиндра, изменениями вязкости жидкости пренебрегать уже нельзя.

**К контрольному вопросу № 5**

Вы сделали правильный выбор. Согласно формуле (1.33) при  $F = 0,05 \text{ см}^2$  масса грузов, а, следовательно, и габаритные размеры прибора находятся в разумных пределах.

**3.2. Поправки и погрешности поршневых манометров**

Показания поршневых манометров, как и любых других приборов, зависят от условий, в которых проводятся измерения. Поэтому, несмотря на то, что поршневые манометры являются наиболее стабильными по сравнению с манометрами других типов, в их показания при измерениях высокой точности необходимо вводить соответствующие поправки, учитывающие влияние условий измерений. К ним относятся влияние температуры окружающей среды, деформации поршня и цилиндра под действием измеряемого давления, а для поршневых манометров, в которых измеряемое давление определяется по весу уравнивающих его грузов, необходимо учитывать местное ускорение свободного падения и потерю массы грузов в воздухе.

**Поправка на температуру.** Основная постоянная поршневого манометра — эффективная площадь поршня  $F$  — определяется при нормальной температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ . Если при измерениях температура поршневого манометра отличается от нормальной, то эффективная площадь

$$F = F_{20} [1 + (\alpha + \beta) (t - 20^\circ\text{C})],$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты линейного расширения материалов поршня и цилиндра.

Так как площадь поршня увеличивается при увеличении температуры, то при одном и том же давлении увеличится сила, необходимая для уравнивания давления, а следовательно, температурная поправка должна вводиться со знаком „минус”.

Температурная поправка

$$\Delta p_t = -p (\alpha + \beta) (t - 20^\circ\text{C}). \quad (3.12)$$

Следует отметить, что температурная поправка практически не зависит от формы поршневой пары или наличия в измерительной системе более одной поршневой пары, если температура различных частей измерительной системы манометра одинакова.

Если поршень и цилиндр изготовлены из стали ( $\alpha = \beta$ )  $= 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , то температурная поправка

$$\delta_t = \frac{\Delta p_t}{p} = -2,4 \cdot 10^{-5} (t - 20^\circ\text{C}),$$

т. е. 0,0024 % на  $1^\circ\text{C}$ , что в 9 раз меньше чем для жидкостных манометров.

**Поправка на изменение эффективной площади поршня от давления.** Относительное изменение эффективной площади поршня под действием измеряемого давления  $\delta_{F_p} = \Delta F_p / F = \lambda \cdot p$ , где  $\lambda$  — коэффициент изменения площади, значения которого зависят от формы конструкции и упругих свойств материала поршневой пары.

Отсюда поправка к измеряемому давлению

$$\delta_p = -\lambda \cdot p. \quad (3.13)$$

Так же, как и температурная поправка, поправка на изменение эффективной площади поршня от давления отрицательна. Для простой цилиндрической поршневой пары, в которой поршень и цилиндр изготовлены из одного и того же материала, коэффициент изменения площади

$$\lambda = \frac{1}{E} \left( \frac{1}{\frac{R^2}{r^2} - 1} + 2\mu \right), \quad (3.14)$$

где  $r$  и  $R$  — радиусы поршня и цилиндра (наружные);  $E$  — модуль упругости материала, из которого изготовлены поршень и цилиндр;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Если наружный радиус цилиндра существенно больше радиуса поршня ( $R^2/r^2 \gg 1$ ), то коэффициент изменения площади  $\lambda \approx \frac{2\mu}{E}$ . Для



стальных поршня и цилиндра  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па;  $\mu = 0,3$ , а коэффициент изменения площади  $\lambda = 2,67 \cdot 10^{-12}$  Па $^{-1}$ . Отсюда  $\delta_p = -\lambda p = -2,67 \times 10^{-12} \cdot p$ . В зависимости от измеряемого давления поправка на деформацию:

|                |         |        |        |        |
|----------------|---------|--------|--------|--------|
| $p$ , МПа      | 1       | 10     | 100    | 1000   |
| $\delta_p$ , % | -0,0003 | -0,003 | -0,027 | -0,267 |

Таким образом, при измерениях с погрешностью более 0,01 % указанной поправкой можно пренебречь, если измеряемое давление не превышает 10 МПа.

#### К контрольному вопросу № 5

Ваш выбор не рационален. При  $F = 1$  см $^2$  согласно формуле (3.3) масса грузов достигнет 600 кг при измерении давления 60 МПа. Это неприемлемо для поверочных лабораторий и заводов-изготовителей.

**Поправка на местное ускорение свободного падения.** Если при измерениях давление уравнивается весом грузов, то согласно уравнению измерений грузопоршневых манометров  $p = mg/F$ , где  $m$  — масса грузов, необходимых для достижения равновесия;  $g$  — местное ускорение свободного падения. Поэтому при одних и тех же значениях массы грузов и эффективной площади поршня давление прямо пропорционально местному ускорению свободного падения. Вместе с тем, исходя из требований поверочной практики, поршневые манометры должны обеспечивать воспроизведение давлений, значения которых соответствуют номинальным („круглым“) значениям давления. Поэтому при выпуске поршневых манометров из производства масса грузов рассчитывается из условия  $m = p_n \cdot F/g$ , где  $p_n$  — номинальное („круглое“) значение давления.

Если ускорение свободного падения в месте измерений заранее не известно, то масса грузов обычно подгоняется под нормальное ускорение свободного падения  $g_n = 9,80665$  м/с $^2$ . Поэтому при эксплуатации поршневого манометра в месте измерений с ускорением свободного падения  $g$  в показания прибора необходимо ввести поправку

$$\Delta p = p \left( \frac{g}{g_n} - 1 \right);$$

или

$$\delta_g = \frac{\Delta p}{p} = \frac{g}{g_n} - 1. \quad (3.15)$$

В пределах нашей страны указанная поправка может быть довольно большой. Например, если  $g = 9,822$  м/с $^2$ , поправка составляет  $\delta_g = 0,15$  %.

Следует отметить, что так же, как и для жидкостных манометров (см. разд. 2.2), значение нормального ускорения свободного падения  $g_n = 9,80665$  м/с $^2$  обусловлено применением старых единиц давления (кгс/см $^2$ , мм рт.ст., мм вод.ст.). После перехода на единицу давления „Па“ международной системы единиц понятие „нормальное ускорение свободного падения“ теряет смысл. Поэтому в формулах (3.15) вместо

$g_H$  может, в принципе, использоваться любое „круглое” расчетное значение ускорения свободного падения  $g_p$  (9,80; 9,81 м/с<sup>2</sup>), приемлемое для региона, в котором будет использоваться поршневой манометр. При этом выбранное значение ускорения свободного падения должно быть указано в свидетельстве о поверке.

**Поправка на потерю массы грузов в воздухе.** Согласно закону Архимеда, на грузы, наложенные на поршень при измерениях, со стороны окружающего воздуха действует подъемная сила, равная весу воздуха в объеме, занимаемом грузами, т. е.

$$G_B = V_2 \cdot \rho_B \cdot g,$$

где  $V_2 = m/\rho$  — объем грузов;  $\rho_B$  — плотность воздуха.

Поэтому масса грузов, уравнивающая измеряемое давление, уменьшится на  $G_B$ , а давление

$$p = \frac{mg}{F} (1 - \frac{\rho_B}{\rho}). \quad (3.15)$$

Поправка на потерю массы грузов в воздухе  $\delta_B = -\rho_B/\rho$ .

При атмосферном давлении 100 кПа плотность воздуха  $\rho_B = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>; для остальных грузов  $\rho = 7,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Тогда поправка  $\delta_B = -0,015$  %, что необходимо учитывать при высокоточных измерениях.

Таким образом, действительное значение давления, воспроизводимого грузопоршневым манометром, в общем случае

$$p = \frac{mg_p}{F_{20}} (1 + \delta_t + \delta_p + \delta_g + \delta_B), \quad (3.16)$$

где  $F_{20}$  — эффективная площадь поршня при  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $g_p$  — расчетное значение ускорения свободного падения;  $\delta_t$ ,  $\delta_p$  и  $\delta_B$  — относительные значения поправок в соответствии с формулами (3.12), (3.13), (3.14) и (3.15).

В поверочной практике для удобства эксплуатации введение поправок в процессе измерений нежелательно. В этих целях влияние температур сводится к необходимому минимуму ограничением диапазона температур в условиях поверки, а остальные поправки учитываются соответствующей подгонкой массы грузов при изготовлении поршневого манометра или при его применении в другом месте.

Согласно формуле (3.16) расчетное значение массы грузов должно быть

$$m_{\text{рас}} = \frac{p_{\text{рас}} F_{20}}{g_{\text{рас}}} [1 - (\delta_p + \delta_g + \delta_B)], \quad (3.17)$$

где  $p_{\text{рас}}$  — расчетное измеряемое давление;  $g_{\text{рас}}$  — расчетное ускорение свободного падения.

Если поправкой на деформацию поршневой пары под действием давления  $\delta_p$  можно пренебречь, а расчетное ускорение свободного падения  $g_{\text{рас}}$  соответствует местному ускорению свободного падения  $g$ , то

$$m_{\text{рас}} = p_{\text{рас}} \cdot \frac{F_{20}}{g} \left(1 + \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right). \quad (3.17')$$

Заслуживает внимания и другой способ компенсации поправок  $\delta_g$  и  $\delta_{\text{в}}$ , согласно которому последняя производится путем соответствующего выбора эффективной площади поршня. При этом грузы подгоняются под номинальные значения в единицах массы, что упрощает их поверку и позволяет применять при измерениях стандартные разновесы. Расчетная эффективная площадь поршня в этом случае

$$F_{20} = \frac{m_{\text{н}} g}{p_{\text{рас}}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right), \quad (3.18)$$

где  $m_{\text{н}}$  — масса грузов, подогнанных под номинал.

При воспроизведении грузопоршневым манометром давлений, кратных единице давления Па, в соответствии с первым способом (3.17') масса груза, соответствующая, например, давлению  $p = 100$  кПа, при  $g = 9,8155$  м/с<sup>2</sup> и  $F_{20} = 1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> будет равна  $m_{\text{рас}} = 1 \cdot 10^5$  Па  $\times$   $\times (1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/9,8155 м/с<sup>2</sup>)  $\cdot (1 + 0,00015) = 1,01895$  кг.

В соответствии со вторым способом (3.18) при  $m = 1$  кг и прочих равных условиях эффективная площадь поршня должна быть равна  $F_{20} = (1 \text{ кг} \cdot 9,8155 \text{ м/с}^2) / (1 \cdot 10^5 \text{ Па}) (1 - 0,00015) = 0,98140 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, т. е. меньше, чем в первом случае примерно на 1,9 %.

Это позволяет изготавливать такие поршневые пары при помощи имеющейся на заводах-изготовителях технологической оснастки без существенных дополнительных затрат.

Суммарная относительная погрешность поршневого манометра согласно уравнению измерений (3.2) с учетом дополнительных погрешностей

$$\delta_p = \delta_N + \delta_F + \Sigma \delta_i, \quad (3.19)$$

где  $\delta_N$  — относительная погрешность определения силы, необходимой для уравнивания измеряемого давления;  $\delta_F$  — относительная погрешность определения эффективной площади поршня;  $\Sigma \delta_i$  — дополнительные погрешности.

Основные погрешности поршневых манометров  $\delta_N$  и  $\delta_F$ , обусловленные поршневым методом измерения давления, имеют место для приборов всех типов.

**Погрешность определения силы**, уравнивающей измеряемое давление, зависит от способа уравнивания. Для наиболее часто применяемого способа уравнивания веса грузов относительная погрешность

$$\delta_N = \delta_m + \delta_g, \quad (3.20)$$

где  $\delta_m$  — относительная погрешность определения массы грузов;  $\delta_g$  — относительная погрешность определения ускорения свободного падения в месте измерений.

Современная техника измерения массы и ускорения обеспечивает достаточно высокую точность измерений. Погрешности  $\delta_m$  и  $\delta_g$  без особых затруднений могут быть доведены до уровня  $10^{-5} - 10^{-6}$ . Поэтому указанные погрешности выбираются, исходя из соответствия их требуемой суммарной погрешности измерений. Отечественными и международными стандартами регламентировано, что  $\delta_m$  не должно превышать 20 % суммарной погрешности, а  $\delta_g$  — 10 %. Дальнейшее уменьшение погрешности  $\delta_m$  неоправданно, так как при этом повысится трудоемкость изготовления и поверки грузов. В отношении погрешности  $\delta_g$  необходимо отметить, что она при высокоточных измерениях (сравнениях поршневых и жидкостных манометров друг с другом) взаимно исключается.

Наиболее весома погрешность определения эффективной площади поршня  $\delta_F$ , которая составляет 40—50 % суммарной погрешности. За исключением поршневых манометров, применяемых в качестве первичных эталонов, эта погрешность в подавляющем большинстве случаев обуславливается погрешностями, связанными с определением эффективной площади поршня путем сличения показаний поверяемого манометра с показаниями манометра более высокого класса точности. Указанные погрешности — погрешности уравнивания; порог реагирования; погрешности, вызываемые воздействием условий поверки и капиллярными явлениями, а также налипанием смазывающей жидкости на поверхности поршня — носят случайный характер. Однако погрешность определения эффективной площади поршня  $\delta_F$  является систематической в принципе, так как значение эффективной площади поршня  $F$ , записанное в свидетельство о поверке, отличается от истинного значения на постоянное значение. Это относится также и к погрешностям значения ускорения свободного падения  $\delta_g$  и массы грузов  $\delta_m$ . Правда, последняя погрешность может иметь и случайную составляющую, связанную с произвольным подбором грузов при уравнивании измеряемого давления.

Таким образом, основные погрешности поршневого манометра  $\delta_m$ ,  $\delta_g$  и  $\delta_F$  носят систематический характер, что и определяет высокую стабильность показаний грузопоршневых манометров.

Дополнительные погрешности  $\sum \delta_i$ , как было указано выше, носят в основном случайный характер.

В процессе уравнивания давления возникает погрешность, связанная с отклонением наблюдаемого положения поршня от действительного положения равновесия, что обуславливается инерционностью поршневой системы и временем наблюдения, порогом реагирования, точностью отсчетного устройства и другими причинами.

Погрешности, вызываемые условиями поверки, обуславливаются, в основном, точностью определения температуры поршневой пары и ее изменениями за время измерения. В соответствии с (3.12) эта погрешность

$$\delta_t = (\alpha + \beta) \cdot \Delta t, \quad (3.21)$$

где  $\Delta t$  — погрешность определения температуры.

Для стальных поршня и цилиндра при  $\Delta t = 0,5^\circ \text{C}$  погрешности  $\delta_t = = 1,2 \cdot 10^{-5}$  ( $\sim 0,001\%$ ), которой для приборов классов точности 0,02 и 0,05 можно пренебречь. Однако для измерений эталонного уровня погрешность измерения температуры  $\Delta t$  не должна быть  $\leq 0,1^\circ \text{C}$ .

**Влияние смазывающей жидкости.** На границе свободной поверхности смазывающей жидкости и боковой поверхности поршня вдоль его оси действуют капиллярные силы, которые можно оценить по формуле  $P_k = = 2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos\theta$ , где  $r$  — радиус поршня;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $\theta$  — угол смачивания.

Эквивалентное этой силе давление равно:

$$\Delta p_k = \frac{P_k}{\pi r^2} = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r}, \quad (3.22)$$

а соответствующая относительная погрешность измерения давления

$$\delta_k = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{p \cdot r}.$$

Для смазывающих жидкостей (минеральное масло, керосин) коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma \approx 0,03 \text{ Н/м}$ , а угол смачивания в худшем случае составляет  $\theta = 0$  ( $\cos\theta = 1$ ). При эффективной площади поршня  $F_{\text{эф}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 1 \text{ см}^2$  давление, эквивалентное влиянию поверхностного натяжения  $\Delta p_k \leq 0,1 \text{ гПа}$ , что существенно при точном измерении ( $\delta < 0,01\%$ ) давлений, значения которых менее  $p = 100 \text{ кПа}$  (атмосферное давление). В этих случаях применяются поршневые пары с эффективной площадью от 2 до 20  $\text{см}^2$ , чем сводится к минимуму влияние неопределенности поверхностного натяжения.

Суммарное влияние случайных дополнительных погрешностей нормируется так, чтобы  $\Sigma \delta_i \leq 0,3\delta$ , т. е. не более 30 % погрешности измерений поршневых манометров. Указанное легко достигается для образцовых поршневых манометров классов 0,02 и 0,05, а на эталонном уровне случайные погрешности исключаются увеличением количества измерений. При измерении давлений  $p > 1 \text{ МПа}$  влияние дополнительных погрешностей несущественно.

### 3.3. Конструктивные особенности поршневых манометров

Благодаря высокой точности и стабильности поршневые манометры находят преимущественное применение в качестве образцовых и эталонных приборов. При этом, как правило, давление, действующее на поршень, уравнивается весом грузов, который всегда можно определить с необходимой для данных целей точностью.

При измерениях избыточного давления наиболее широко применяются простые одноступенчатые поршневые пары (см. рис. 17, а). На этом принципе основаны образцовые и эталонные манометры с верхними диапазонами измерений от 40 кПа до 250 МПа, а в некоторых случаях до 600 МПа.

Типы и основные характеристики образцовых грузопоршневых манометров избыточного давления, применяемых в нашей стране, приведены в табл. 8.

Таблица 8

| Тип манометра | Диапазон измерений, МПа | Класс точности | Измеряемая среда       |
|---------------|-------------------------|----------------|------------------------|
| МП-0,4        | 0,006–0,04              | 0,2            | Воздух                 |
| МП-2,5        | 0–0,25                  | 0,02           | То же                  |
| МП-6          | 0,04–0,6                | 0,02 и 0,05    | Трансформаторное масло |
| МП-60         | 0,1–6                   | 0,02 и 0,05    | То же                  |
| МПП-60        | 0,1–6                   | 0,05           | Трансформаторное масло |
| МП-600        | 1–60                    | 0,05           | Касторовое масло       |
| МП-2500       | 5–250                   | 0,05           | То же                  |

Погрешности манометров нормируются отдельно для основного диапазона измерений  $p = c : p_{\max} - p_{\max}$  и дополнительного диапазона измерений  $p = p_{\min} - cp_{\max}$ , где  $c = 0,1$ ;  $p_{\min}$  — нижний предел измерений;  $p_{\max}$  — верхний предел измерений.

В основном диапазоне измерений нормируется относительная погрешность  $\delta$  в % от значения измеряемого давления, численно равная классу точности (см. табл. 8). В дополнительном диапазоне измерений нормируется абсолютная погрешность в Па, равная  $\Delta p = \delta cp_{\max}$ .

Конструкции измерительных поршневых систем зависят от измеряемого давления. При давлениях до 0,6 МПа типична конструкция измерительной поршневой системы манометра МП-6 (рис. 19, а).

Поршневая система состоит из стального закаленного поршня 1 и цилиндра 2. В целях уменьшения сил жидкостного трения при вращении поршень притерт к цилиндру по двум узким поясам, расположенным в верхней и нижней частях цилиндра. К верхней части цилиндра прикреплен ограничительная рамка 3 с указателем положения равновесия поршня 4 и ограничителем 6, а нижняя часть цилиндра выполнена в виде штуцера для присоединения к поверочной установке. На верхней части поршня укреплен грузоприемная тарелка 5 для наложения уравнивающих грузов. Эффективная площадь поршня манометров этого типа обычно равна  $1 \text{ см}^2$ , так что общая масса грузов не превышает 6 кг.

При давлениях до 6 МПа в манометрах типа МП-60 с целью уменьшения утечек рабочей жидкости поршень притирается к цилиндру по всей длине поверхности их соприкосновения (рис. 19, б). Кроме того, в связи с существенным увеличением массы уравнивающих грузов ( $m = 30 \text{ кг}$  при  $F = 0,5 \text{ см}^2$ ) применяется более прочный ограничитель перемещения поршня, который выполнен в виде втулки с эксцентрическим отверстием для обеспечения сборки поршневой системы.

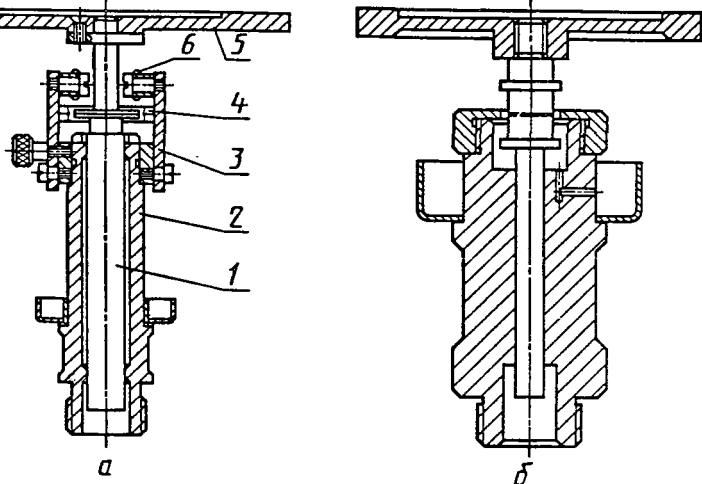


Рис. 19. Грузопоршневые манометры с непосредственным наложением грузов на поршень

При давлениях до 60 и 250 МПа в манометрах МП-600 и МП-2500 масса грузов, несмотря на уменьшение эффективной площади поршня до  $F = 0,05 \text{ см}^2$ , доходит до  $m = 75 \text{ кг}$ , что для поршня диаметром 2,5 см недопустимо по соображениям его прочности. Поэтому в конструкциях манометров данного типа применяют промежуточные грузоприемные устройства (рис. 20). Измерительная система манометров состоит из поршневой пары, включающей поршень 1 с эффективной площадью  $F = 0,05 \text{ см}^2$ , который воспринимает измеряемое давление, и поршень 2, и грузоприемного устройства, посредством которого вес грузов 8 передается на поршень 1 для уравнивания давления. Наложение грузов производится на колоколообразную грузоприемную тарелку 7, жестко связанную с опорной штангой 4, которая центрируется и вращается относительно корпуса 5 двумя шариковыми подшипниками 6. Влияние биений, которые могут возникнуть вследствие несоосности поршня 1 и штанги 4 при вращении, устраняется шарнирно соединенной с ними распоркой 3. Устройство эффективно устраняет поперечные нагрузки на измерительный поршень.

При измерении высоких (до 1000 МПа) и сверхвысоких (до 2500 МПа) избыточных давлений применение одноступенчатых поршневых систем нецелесообразно. В этих случаях наиболее эффективно применение измерительных систем, содержащих двухступенчатые поршневые пары (мультипликаторы) по типу показанных на рис. 18, б.

При измерениях избыточного давления воздуха или инертных газов, близкого по значению к атмосферному давлению (100 кПа), а также отрицательного избыточного давления (разрежения), наиболее часто при-

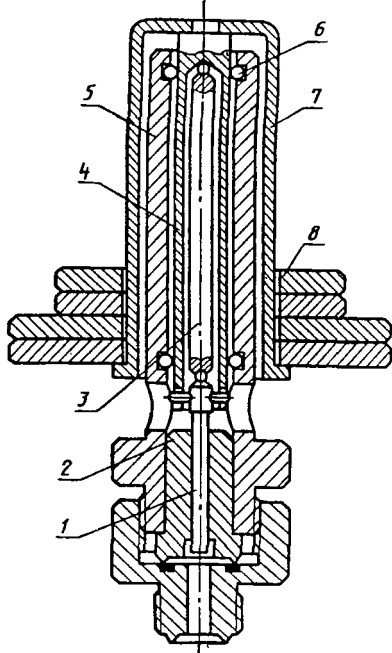


Рис. 20. Поршневой манометр с промежуточным грузоприемным устройством

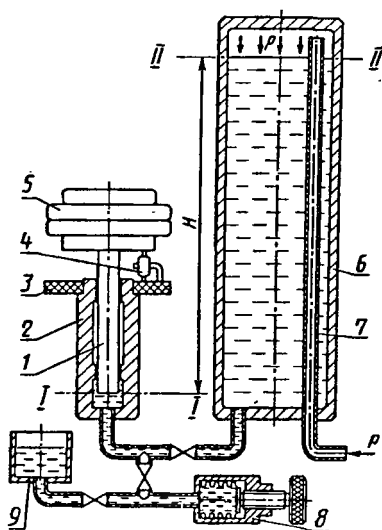


Рис. 21. Образцовый грузопоршневой манометр МА-2,5 класса 0,02

меняют измерительные системы с уравновешенным поршнем. Например, в образцовом грузопоршневом манометре МП-2,5 класса 0,02 собственный вес поршня уравновешен давлением столба жидкости. Поршневая колонка манометра (рис. 21) состоит из поршня 1 и цилиндра 2, внутренний канал которого выполнен в виде двух узких поясков. На грузоприемную тарелку поршня при измерении давления накладываются грузы 5. Вращение поршня вокруг его оси осуществляется от электродвигателя с помощью шкива 3 и роликового поводкового механизма 4. Нижняя часть цилиндра посредством трубки с вентилем сообщается с цилиндрическим сосудом 6, заполненным рабочей жидкостью (смесь трансформаторного масла с керосином), давление которой уравнивает собственный вес поршня с грузоприемной тарелкой. В верхнюю часть сосуда 6 по трубке 7 подается измеряемое давление воздуха или инертного газа. Для регулировки высоты столба жидкости в сосуде, необходимой для уравнивания веса поршня, измерительная система снабжена регулировочным прессом 8 и воронкой. Уравнивание веса поршня при атмосферном давлении может производиться также наложением на поршень мелких балластных грузиков.



Если вес поршня при атмосферном давлении уравновешен, то измеряемое избыточное давление на уровне поверхности жидкости в сосуде II—II определяется весом наложенных на поршень грузов

$$p_{II} = \frac{mg}{F} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho}\right), \quad (3.23)$$

т. е. в отличие от манометров с неуравновешенным поршнем нижний предел измерений становится равным нулю. Давление на уровне нижнего торца поршня I—I, учитывая пропорциональность изменения давления столба воздуха в трубке 7 измеряемому избыточному давлению, равно

$$p_I = \frac{mg}{F} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho}\right) + H \rho_B g \cdot \frac{p}{B} \quad (3.24)$$

или

$$p_I = \frac{mg}{F} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho} + \frac{H \rho_B \cdot g}{B}\right). \quad (3.25)$$

Указанное справедливо при приведении измеряемого давления и к любому другому уровню. Если этот уровень находится ниже уровня II—II на 1,3 м, то для манометра МП-2,5 поправки на потерю веса грузов в воздухе и на приведение к измеряемому уровню взаимно компенсируются, т. е.  $p_I = mg/F$ .

При измерении отрицательного избыточного давления (разрежения) в нашей стране нашли применение образцовые грузопоршневые мановакуумметр МВП-2,5 класса 0,05 и вакуумметр ВП-1 класса 0,02.

Принципиальная схема мановакуумметра МВП-2,5 (рис. 22) основана на взаимном уравнивании простой и дифференциальной поршневых пар. Простая поршневая пара, состоящая из притертых друг к другу поршня 1 и цилиндра 2, с помощью трубки сообщается с дифференциальной поршневой парой, состоящей из двухступенчатого поршня 3 и цилиндра 4, которые притерты друг к другу по большему и меньшему диаметрам поршня. Нижняя узкая ступень поршня 3 сообщается посредством трубки с резервуаром 5. Все полости поршневых пар, соединительные трубки и, частично, резервуар заполнены маловязким минеральным маслом, обычно трансформаторным. Для заполнения измерительной системы маслом манометр снабжен сифонным прессом 7 и воронкой 10, подключенных вентилями 6, 8 и 9.

При сообщении резервуара с атмосферным давлением простой и дифференциальной поршни и столб жидкости в резервуаре взаимно уравниваются, причем расположение поршней относительно соответствующих цилиндров отсчитывается указателями положения, закрепленными на цилиндрах. Поэтому нижний предел измерений, как и манометра МП-2,5, не зависит от собственного веса поршней.

При измерении избыточного давления, действующего на поверхность жидкости в резервуаре, для его уравнивания грузы накладываются на грузоприемную тарелку поршня 3. Давление определяется по формуле

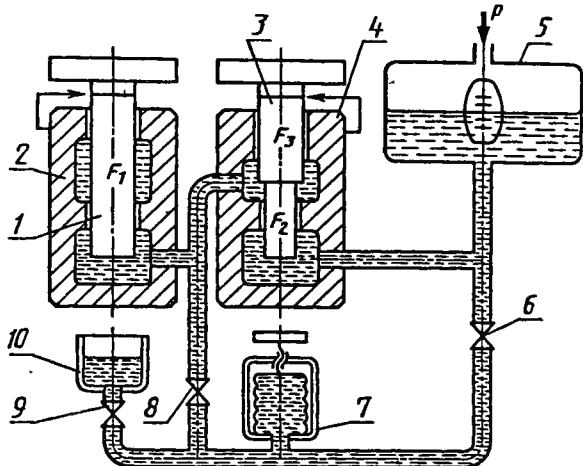


Рис. 22. Образцовый грузопоршневой мановакуумметр МВП-2,5 класса 0,05

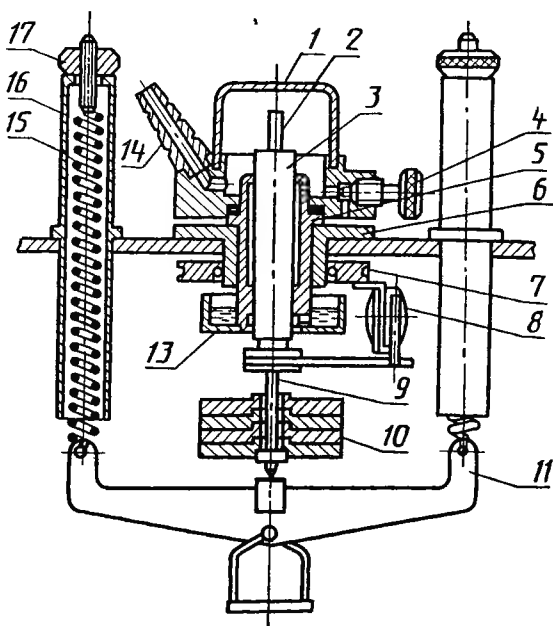


Рис. 23. Образцовый грузопоршневой вакуумметр ВП-1 класса 0,02

$$p = \frac{m_3 \cdot g}{F_2} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho}\right), \quad (3.26)$$

где  $m_3$  — масса грузов, наложенных на поршень 3;  $F_2$  — эффективная площадь нижней части поршня 3. Остальные обозначения прежние.

При измерении отрицательного избыточного давления (разрежения), когда давление в резервуаре 5 меньше атмосферного, для сохранения равновесия поршневой системы грузы накладываются на поршень 1, разрежение

$$V = \frac{m_1 \cdot g}{F_2} \cdot \frac{F_3 - F_2}{F_1} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho}\right) \quad (3.27)$$

или

$$V = K \cdot \frac{m_1 \cdot g}{F_2} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho}\right), \quad (3.28)$$

где  $m_1$  — масса грузов, наложенных на поршень 1;  $K = \frac{F_3 - F_2}{F_1}$  — от-

ношение разности эффективных площадей верхней и нижней частей дифференциального поршня 3 к эффективной площади простого поршня 1.

Мановакуумметр МВП-2,5 имеет следующие метрологические характеристики: диапазон измерения от  $-100$  кПа до  $+250$  кПа; допускаемая основная погрешность  $\pm 5$  Па при давлении до 10 кПа и  $\pm 0,05$  % от измеряемого значения при давлении свыше 10 кПа.

Принципиальная схема вакуумметра ВП-1 (рис. 23) основана на уравнивании веса простого поршня пружинным механизмом. Измерительная система состоит из поршня 3 (с наконечником 9 для наложения грузов 10 и указателем положения равновесия 2), вращающегося вокруг своей оси в цилиндре 5; установленного на втулку 6 от электродвигателя посредством шкива 7 и поводка 8. Вес поршня уравновешен усилием растяжения двух пружин 14, расположенных в трубках 15 и соединенных между собой коромыслом 11, на среднюю часть которого опирается наконечник поршня. К нижней части цилиндра присоединена заполненная маслом воронка 13, что предохраняет от попадания в зазор между поршнем и цилиндром атмосферного воздуха (жидкостный затвор). Измеряемое разрежение подается в верхнюю часть прибора под колпачок 1 с помощью штуцера 16. Вентиль 4 предназначен для слива жидкости. Положение равновесия поршня регулируется гайками 17 и определяется по шкале отсчетной оптической системы (на схеме не показана).

В отличие от грузопоршневых манометров для измерения давления жидкости, которая практически несжимаема, и потому для замкнутого объема инерционность измерительной системы, несмотря на необходимость применения массивных грузов, достаточно мала, динамические характеристики грузопоршневых манометров для измерения давления воздуха или газа имеют существенное значение.

Одним из важнейших параметров, определяющих динамические характеристики грузопоршневого манометра является жесткость его измерительной системы

$$c = \frac{\Delta P}{\Delta X}, \quad (3.29)$$

где  $\Delta X$  — отклонение поршня от положения равновесия;  $\Delta P$  — сила, вызывающая указанное отклонение.

Для измерительной системы со свободно плавающим в воздухе поршнем единственной силой, возникающей при отклонении поршня от положения равновесия, является изменение давления столба воздуха, которая весьма мала, что приводит к относительно большой инерционности показаний.

В измерительных системах манометра МП-2,5 (см. рис. 21) и мановакуумметра МВП-2,5 (см. рис. 22) при отклонении поршня от положения равновесия изменяется давление на его площадь столба жидкости, а так как плотность жидкости (трансформаторное масло) в сотни раз больше, чем плотность воздуха, то соответственно увеличивается и жесткость измерительной системы  $c$ , равная в данном случае 0,8 Н/м, что соответствует жесткости измерительной системы жидкостного манометра с масляным заполнением.

Дальнейшие возможности увеличения жесткости, а следовательно, и уменьшения инерционности, предоставляет измерительная система вакуумметра (см. рис. 23), в котором поршень уравновешен пружинами с любой, оптимальным образом выбранной жесткостью. Исходя из требуемых габаритных размеров прибора и точности отсчетного устройства, жесткость измерительной системы вакуумметра  $c$  принята равной 10 Н/м, что существенно увеличивает его быстродействие. Однако при этом требуется отсчетный микроскоп. По инерционности данный прибор аналогичен ртутному мановакуумметру.

Следует подчеркнуть еще одну отличительную особенность конструкции вакуумметра ВП-1: наличие жидкостного затвора. При давлении воздуха в пространстве над верхним торцом поршня, меньшим, чем атмосферное давление, в зазор между поршнем 3 и цилиндром 5 поступает не воздух, а масло из воронки 13. Поэтому в отличие от манометра МП-2,5 и мановакуумметра МВП-2,5 отпадает необходимость включения в измерительную систему промежуточного жидкостного столба. Измеряемая разность давлений воздуха действует непосредственно на верхний и нижний торцы поршня.

Измеряемое разрежение (отрицательное избыточное давление) определяется по формуле

$$V = p_{\text{в}} - p_{\text{абс}} = \frac{mg}{F} \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right), \quad (3.30)$$

где  $p_{\text{в}}$  — атмосферное давление окружающего воздуха;  $p_{\text{абс}}$  — абсолютное давление над верхним торцом поршня;  $m$  — масса грузов 10, накладываемых на наконечник 9. Остальные обозначения прежние.

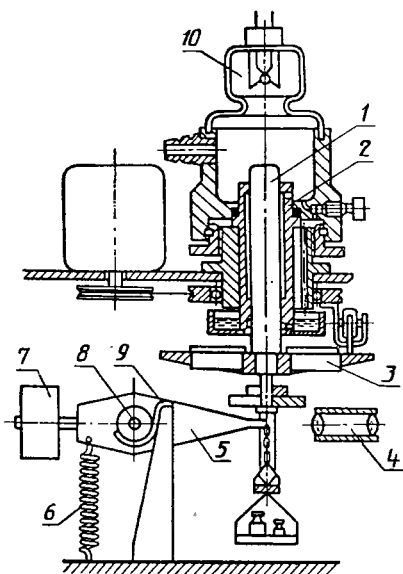


Рис. 24. Образцовый грузопоршневой барометр БП-1у класса 0,01

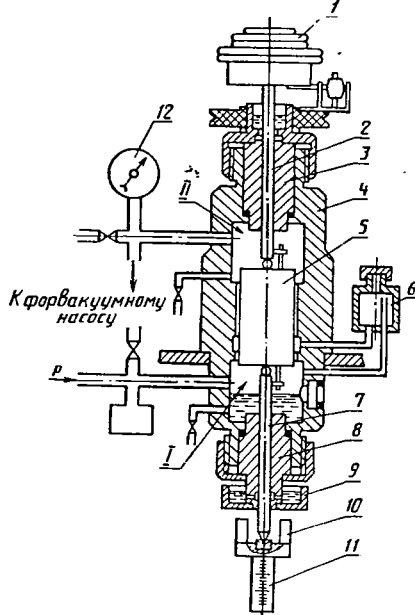


Рис. 25. Образцовый грузопоршневой манометр абсолютного давления МПА-15 класса 0,01

Аналогичная принципиальная схема положена в основу грузопоршневого барометра БП-1у (рис. 24). В отличие от вакуумметра грузопоршневой барометр предназначен для измерения атмосферного давления, поэтому пространство над верхним торцом поршня 1, притертого к цилиндру 2, откачивается до  $p_{\text{ост}} \leq 0,05$  гПа, которое измеряется термодатным вакуумметром 10. В целях обеспечения более высокой точности измерений для уравнивания собственного веса поршня взамен пружин применено рычажное устройство 5 с противовесом 7. Ось рычага 8 покоится на ленточной подвеске 9, необходимая жесткость измерительной системы обеспечивается пружиной 6. Комбинированное уравнивание веса поршня с помощью противовеса и пружины дает возможность более гибко сочетать чувствительность, а следовательно, и точность отсчета с требуемыми динамическими характеристиками прибора и его габаритными размерами. В барометре БП-1у жесткость измерительной системы  $c = 4$  Н/м, что обеспечивает более высокую, чем у вакуумметра ВП-1 чувствительность при одних и тех же габаритных размерах прибора.

Измеряемое атмосферное давление при установке поршня с помощью отсчетного микроскопа 4 в положение равновесия определяется весом грузов 3 и разновесов 11

$$p_{\text{в}} = \frac{mg}{F} \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right) + p_{\text{ост}}, \quad (3.31)$$

где  $m$  — масса грузов 3 и разновесов;  $p_{\text{ост}}$  — остаточное давление над верхним торцом поршня, определяемое вакуумметром 10.

Помимо измерения атмосферного давления, барометр может быть использован в качестве образцового вакуумметра. В этом случае разделение определяется по формуле (3.30).

Метрологические характеристики барометра: верхний предел измерений 110–120 кПа (в зависимости от массы комплекта грузов); погрешность измерений — 4 или 10 Па (в зависимости от точности аттестации барометра).

Для измерения абсолютного давления воздуха (газа) в нашей стране серийно выпускаются грузопоршневые манометры МПА-15 класса 0,01 (рис. 25). Поршневая система манометра состоит из трех шарнирно сочлененных, соосных поршневых пар, которые образуют, в отличие от поршневых вакуумметров и барометров, две измерительные камеры. В нижнюю измерительную камеру 1 подается измеряемое абсолютное давление  $p_{\text{абс}}$ , а верхняя измерительная камера II откачивается. Поршнем 2, притертого к цилиндру 3, вес грузов 1, который уравнивает силу, возникающую под действием абсолютного давления на средний измерительный поршень 5, передается на последний, а поршень 7, притертый к цилиндру 8, опирается на коромысло 10 рычажного механизма (на схеме не показан), уравнивающего собственный вес поршневой системы манометра. С целью компенсации влияния атмосферного давления поршни 2 и 7 имеют одинаковые эффективные площади. Положение равновесия поршневой системы фиксируется проекционным отсчетным устройством (на схеме не показано) по шкале 11, а остаточное давление в камере II определяется термомпарным вакуумметром 12.

Абсолютное, а также и атмосферное давления, определяются по формуле

$$p_{\text{абс}} = \frac{mg}{F-f} \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right) + p_{\text{ост}}, \quad (3.32)$$

где  $m$  — масса грузов, накладываемых на поршневую систему для достижения равновесия;  $F$  — эффективная площадь измерительного поршня 5;  $f$  — эффективные площади вспомогательных поршней 2 и 7;  $p_{\text{ост}}$  — остаточное давление в камере II.

Помимо измерения абсолютного давления манометром МПА-15 можно измерять избыточное давление (положительное и отрицательное) и разность давлений.

При измерении избыточного давления камера II сообщается с атмосферным давлением, а избыточное давление  $p_{\text{и}} = \frac{mg}{(F-f)} \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right)$ , подается в камеру I.

При измерении разрежения (отрицательного избыточного давления) с атмосферным давлением сообщается камера I, а разрежение в камере

II определяется по формуле  $V = \frac{mg}{(F-f)} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho}\right)$ .

Разность давлений определяется по формуле  $\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{mg}{(F-f)} \times \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho}\right)$ , где  $p_1$  — давление в камере I;  $p_2$  — давление в камере II, причем  $p_1 > p_2$ .

#### Метрологические характеристики манометра МПА-15

Диапазон измерений . . . . . 0—400 кПа (0—3000 мм рт.ст.)

Погрешность измерений:

в диапазоне от 0 до 20 кПа

(0—150 мм рт.ст.) . . . . . 5 Па (0,05 мм рт.ст.)

в диапазоне свыше 20 до 100 кПа

(150—1000 мм рт.ст.) . . . . . 10 Па (0,1 мм рт.ст.)

в диапазоне от 100 кПа до

400 кПа (1000—3000 мм рт.ст.) . 0,01 % измеряемой величины

Для измерения абсолютного давления применяют также поршневые системы с одним простым поршнем и двумя цилиндрами, каждый из которых содержит измерительные камеры: нижнюю — для сообщения с измеряемым абсолютным давлением, верхнюю — для подключения откачанной вакуумной системы. Вес грузов, необходимых для уравновешивания абсолютного давления, посредством нагрузочного устройства действует на среднюю часть поршня, к которой обеспечен доступ со стороны окружающей манометр среды. Приборы этого типа, например, грузопоршневой манометр МАД-3, применяются как в государственных поверочных, так и в ведомственных метрологических службах.

Наименее разработаны грузопоршневые манометры для измерения разности давлений, особенно при больших статических давлениях. В нашей стране используются отдельные опытные образцы таких приборов.

Наиболее доступен для реализации способ измерения разности двух относительно больших давлений, основанный на применении двух стандартных грузопоршневых манометров (рис. 26). Установка содержит однотипные грузопоршневые манометры 2 и 7, которые подключены к минусовой и плюсовой камерам поверяемого дифманометра 4. При открытом вентиле 3 грузами 1 и 8 поршни манометров уравниваются в положении, в котором их торцы устанавливаются на уровне I—I. При этом давление в камерах поверяемого дифманометра одинаково и соответствует заданному статическому давлению

$$p_{ст} = p_1 = p_2 = \frac{m_{01} \cdot g}{F_1} = \frac{m_{02} \cdot g}{F_2},$$

где  $m_{01}$  — масса грузов 8;  $m_{02}$  — масса грузов 1.

Затем вентиль 3 закрывается, и с помощью вентиля 5 и 6 достигается требуемая разность давлений плюсовой и минусовой камер

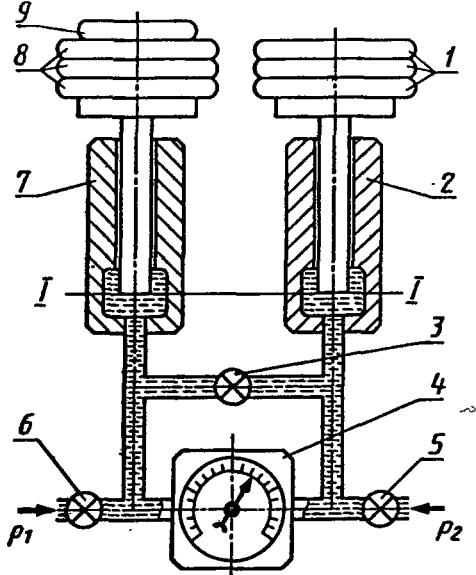


Рис. 26. Образцовый грузопоршневой дифманометр для поверки при статическом давлении

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\Delta m \cdot g}{F_1} \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right), \quad (3.33)$$

где  $\Delta m$  — масса груза 9, дополнительно наложенная на поршень манометра 7 для приведения обоих поршней в начальное положение равновесия.

Верхние пределы измерений обоих манометров выбираются в зависимости от статического давления и измеряемой разности давлений. При этом необходимо соблюдение условия

$$p_1 = \Delta p + p_2 \leq p_{\text{пр}}, \quad (3.34)$$

где  $p_{\text{пр}}$  — верхний предел измерений применяемых грузопоршневых манометров;  $p_2 = p_{\text{ст}}$ .

Суммарная погрешность измерения разности давлений с помощью двух грузопоршневых манометров

$$\delta_{\Delta p} = \delta_{\text{ур}} + \delta, \quad (3.35)$$

где  $\delta_{\text{ур}} = t_{\alpha} \sigma \frac{p_2}{\Delta p}$  — погрешность предварительного уравнивания

поршневых манометров;  $\delta$  — относительная погрешность образцового поршневого манометра при измерении разности давлений;  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение при предварительном уравнивании;  $t_{\alpha} = 2$  — квантиль распределения случайных погрешностей.

Относительная погрешность при измерении разности давлений



$$\delta = \frac{0,1 \cdot p_{\text{пр}} \cdot \delta_0}{\Delta p} \quad \text{при } \Delta p \leq 0,1 p_{\text{пр}},$$

$$\delta = \delta_0 \quad \text{при } \Delta p > 0,1 p_{\text{пр}}.$$

Из (3.33) следует, что чем меньше измеряемая разность давлений  $\Delta p$  по сравнению со статическим давлением  $p_2$ , тем больше погрешность измерений разности давлений.

Например, при измерении разности давлений  $\Delta p = 0,1$  МПа при  $p_{\text{ст}} = 16$  МПа для соблюдения условия (1.33) необходимо применение образцовых грузопоршневых манометров МП-600 с верхним пределом измерений 60 МПа, так как при применении манометра МП-60 верхний предел измерений  $p_{\text{пр}} < p_{\text{ст}}$ . В этом случае даже при применении рабочих эталонов, относительная погрешность которых составляет  $\delta_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  (0,005 %), а среднее квадратическое отклонение показаний  $\sigma = 1 \cdot 10^{-5}$  (0,001 %), суммарная погрешность измерения разности давлений  $\delta_{\Delta p} = 6 \cdot 10^{-3}$  (0,6 %), что позволяет проводить поверку дифманометров класса 2,5 и хуже. Однако, при увеличении разности давлений до  $\Delta p = 0,63$  МПа при прочих равных условиях погрешность снижается до  $\delta_{\Delta p} = 1 \cdot 10^{-3}$  (0,1 %), что приемлемо при поверке более точных дифманометров (классов 0,4; 0,6; 1,0; 1,6). При уменьшении статического давления требования к точности образцовых грузопоршневых манометров соответственно снижаются.

Более широкие возможности повышения точности измерения относительно статического давления разности давлений обеспечивает принцип действия, положенный в основу образцовых грузопоршневых дифманометров ДМП-0,25-160 и ДМП-6,3-320.

Измерительная система дифманометра (рис. 27) содержит трехступенчатый поршень, состоящий из простого поршня 2, на который в его средней части напрессован измерительный поршень 4; цилиндра 6 и двух втулок 3 и 7. Поршень 2 в верхней части притерт к втулке 3, в нижней — к втулке 7, измерительный поршень 4 — к средней части цилиндра 6. Поршневая система опирается на коромысло 8, которое двумя винтовыми пружинами уравнивает собственный вес поршневой системы. Между измерительным поршнем и втулками находятся две измерительные камеры, в которые подаются давления  $p_1$  и  $p_2$ . Разность давлений уравнивается грузами 1. Разность давлений

$$\Delta p = \frac{mg}{F-f} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho}\right), \quad (3.36)$$

где  $m$  — масса грузов 1;  $F$  — эффективная площадь поршня 4;  $f$  — эффективная площадь поршня 2.

Очевидное преимущество трехступенчатой измерительной поршневой системы по сравнению с предыдущей системой, основанной на применении двух поршневых манометров, состоит в том, что отпадает необходимость уравнивания больших статических давлений, которые взаимно компенсируют друг друга. Поэтому, в принципе, погрешность измерений разности давлений не зависит от статического давления.

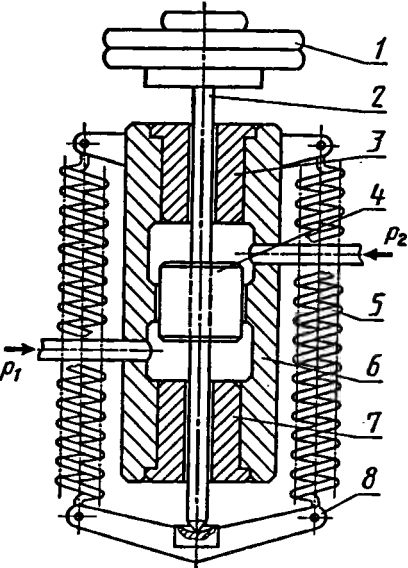


Рис. 27. Образцовый грузопоршневой дифманометр с трехступенчатой поршневой системой

С другой стороны, существенное уменьшение массы грузов резко снижает инерционность дифманометра. Немаловажным является и то, что намного увеличиваются возможности автоматизации процесса измерений. Однако, к сожалению, приборы этого типа в нашей стране серийно не выпускаются.

3.4. Поршневые автоматизированные задатчики давления

Основное назначение поршневых манометров состоит в поверке и градуировке средств измерения давления, применяемых в народном хозяйстве. При этом находят применение как методы поверки, основанные на задании точного значения давления по образцовому прибору с последующим отсчетом показаний поверяемого прибора, так и методы поверки, основанные на регулировании давления по отметкам поверяемого прибора с последующим измерением этого давления по образцовому прибору. Однако, в связи с широким распространением в технике измерения и регулирования давления бесшкальных измерительных преобразователей основной объем поверочных работ проводится методом задания образцового давления. Традиционные поршневые манометры, отличаясь универсальностью (они применимы как для задания давления, так и для его измерения), нуждаются в применении вспомогательных регулировочных устройств, причем все работы по поверке и градуировке проводятся непосредственно оператором. Это предопределило все более широкое использование в поверочной практике автоматизированных поршневых задатчиков давления, которые, помимо увеличения производительности поверочных работ, повышают комфортность условий труда оператора.

В настоящее время в народном хозяйстве страны применяются автоматизированные задатчики давления различных типов, предназначенных для измерения давления как жидкости, так и воздуха. Краткие технические характеристики наиболее часто применяемых в нашей стране задатчиков давления приведены в табл. 9.

При выборе уровня автоматизации необходимо учитывать назначение задатчика, объем поверочных работ, условия применения, сложность конструкции и стоимость, требования к квалификации обслуживающего персонала и пр. Во многих случаях применение автоматизированных

| Тип задатчика | Класс точности | Диапазон измерений                            | Измеряемая среда       | Форма поршня     |
|---------------|----------------|-----------------------------------------------|------------------------|------------------|
| Воздух-250    | 0,1            | Верхний предел измерения от 10 Па до 2,5 кПа* | Воздух                 | Нецилиндрический |
| Воздух-1,6    | 0,02; 0,05     | 1–160 кПа                                     | То же                  | То же            |
| Воздух-2,5    | 0,02; 0,05     | 25–250 кПа                                    | —,—                    | —,—              |
| Воздух-6,3    | 0,02; 0,05     | 63–630 кПа                                    | —,—                    | —,—              |
| АЗД-0,4       | 0,1            | 8–40 кПа                                      | —,—                    | Цилиндрический   |
| АЗД-2,5       | 0,05           | 10–250 кПа                                    | —,—                    | То же            |
| АЗДГ-16       | 0,05           | 0,04–1,5 МПа                                  | Трансформаторное масло | —,—              |
| АЗДГ-60       | 0,05           | 0,1–6 МПа                                     | То же                  | —,—              |
| АЗДГ-600      | 0,05           | 1–60 МПа                                      | Касторка               | —,—              |

\* Верхние пределы измерений поверяемых приборов составляют от 10 до 2,5 кПа (15 комплектов грузов).

задатчиков в настоящее время вообще не целесообразно. Однако, по мере совершенствования задатчиков их использование будет постоянно расширяться.

Одним из первых в нашей стране нашел применение автоматический задатчик давления АЗД-0,4, предназначенный для проверки и регулировки мембранных и ртутных сфигманометров (приборов для измерения давления крови в медицинских учреждениях) с верхним пределом измерений 40 кПа (300 мм рт.ст.).

Задатчик (рис. 28) содержит поршень 1, к верхней части которого прикреплена ступенчатая втулка 2 с трубкой 5, цилиндр 7, смонтированный на разделительный бачок 12 и корпус 13. На корпусе покоятся грузы 6; фотоэлектрическая следящая система, состоящая из фотодиода 3 и осветителя 4; электромагнитные клапаны 8 и 10, управляемые транзисторно-релейной схемой (на рисунке не показана), и коллектор 9 для подключения поверяемых манометров. Нижняя часть разделительного бачка заполнена керосином, который поступает под давлением в зазор между поршнем и цилиндром, остальная часть измерительной системы заполнена воздухом. В процессе измерений корпус 13 с лежащими на нем грузами 6 и поршень 1 с помощью электродвигателя 11 вращаются относительно оси цилиндра 7.

Принцип действия задатчика заключается в следующем. При нажатии кнопки „пуск” пульта управления клапан 10 открывается, и воздух от источника питания поступает в верхнюю часть бачка, повышая давление в измерительной системе до значения, которое уравнивает собственный вес поршня с укрепленными на нем втулкой и трубкой. При дальнейшем увеличении давления при подъеме поршня ступенчатая втулка поочередно снимает с корпуса 13 грузы, чем обеспечивается создание по-



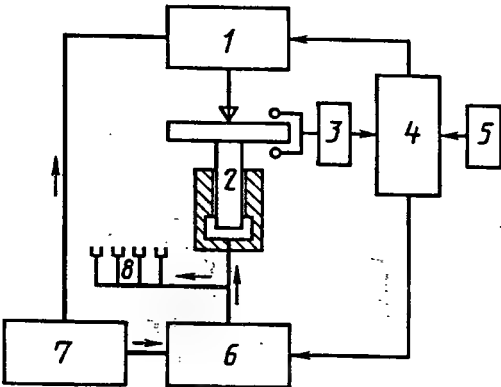


Рис. 29. Структурная блок-схема автоматического задатчика давления АЗДГ

нием, жидкости, которую одновременно подается к поверяемым приборам.

По программе, заложенной в перфокарте блока 4, механизм наложения грузов 1 нагружает поршень манометра 2 и одновременно блоку 6 дается команда на регулировку давления в измерительной системе, обработка которого прекращается по сигналам устройства 3 при достижении равновесия поршня. Пульта 5 обеспечивает следующие режимы работы:

автоматические на 1 цикл (переход со ступени на ступень, выдержка на верхнем пределе, обратный ход) или непрерывный (повторение циклов с выдержкой на нуле);

ручной (переход на каждую следующую ступень по отдельным командам оператора);

регулируемый и наладочный (плавное изменение давления от нуля до заданного значения и обратно по команде оператора), а также специальные технологические режимы и блокировки.

АЗДГ выпускаются в трех модификациях с верхними пределами измерений 1,6; 6,0; 60 МПа с числом ступеней 160 и 60. Время перехода со ступени на ступень 12 с; режим перехода двухскоростной, что обеспечивает плавный односторонний подход к поверяемой отметке. Габаритные размеры одного задатчика 960X720X1500 мм, масса 300 кг. Особенно эффективны задатчики давления при массовой поверке измерительных преобразователей давления с токовыми выходными сигналами, где достигается полная автоматизация с распечаткой результатов поверки или градуировки.

Помимо автоматизированных задатчиков давления, основанных на измерительных системах с цилиндрическими поршневыми парами, в поверочной практике находят применение автоматизированные задатчики давления с нецилиндрическим поршнем, принцип действия которого основан на динамическом равновесии веса поршня с давлением, действующим на него со стороны протекающей через междроссельную камеру измеряемой среды. Нецилиндрический поршень, имеющий форму тела вращения, обычно выполняется в форме сферы или усеченного конуса. Измерительная система задатчика (рис. 30) содержит поршень 1 сферической (рис. 30, а) или конической (рис. 30, б) формы и цилиндрическое сопло 2, образующее переменный дроссель, отражатель струи воздуха питания 3 и постоянный дроссель 4. Междроссельная камера А трубкой

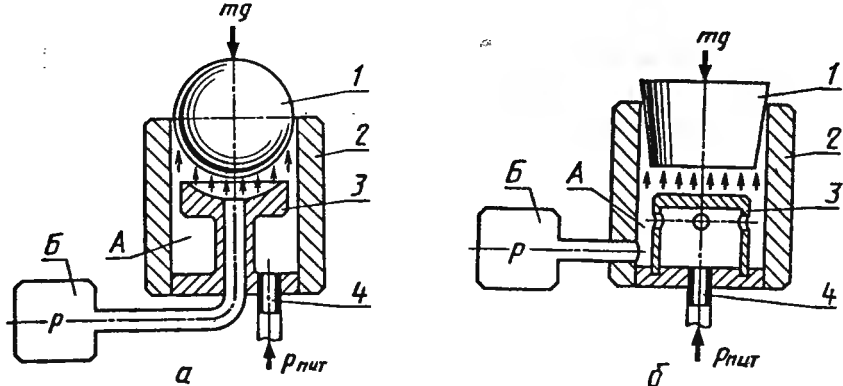


Рис. 30. Поршневые преобразователи силы в давление с нецилиндрическим поршнем

соединяется с объемом *Б*, в который подается выходное давление преобразователя:

Так же, как и в классическом поршневом манометре с цилиндрическим поршнем в равновесном состоянии, усилие, приложенное к поршню, уравнивается действующим на площадь его поперечного сечения давлением в междроссельной камере и силами трения протекающей через кольцевой зазор измеряемой среды. Однако, в отличие от цилиндрической поршневой пары геометрическая площадь сечения нецилиндрического поршня существенно изменяется в зависимости от его положения относительно верхней кромки сопла. Поэтому эффективную площадь нецилиндрического поршня принято представлять в виде

$$F_{\text{эф}} = F_c \left( 1 - \frac{G \cdot v}{p \cdot F_c} \cdot \cos \alpha \right), \quad (3.37)$$

где  $F_c$  — геометрическая площадь сечения отверстия сопла на уровне верхней кромки;  $G$  — массовый расход измеряемой среды (газа) через переменный дроссель;  $p$  — давление в междроссельной камере;  $\alpha$  — угол наклона струи газа при выходе из кольцевого зазора;  $v$  — скорость истечения газа из кольцевого зазора.

Так же, как и в традиционных поршневых манометрах, измеряемое давление определяется по формуле (3.23)

$$p = \frac{mg}{F_{\text{эф}}} \left( 1 - \frac{\rho_B}{\rho} \right).$$

По принципу действия датчики с нецилиндрическим поршнем имеют ряд очевидных преимуществ по сравнению с манометрами с цилиндрическим поршнем. Непрерывный подвод в измерительную систему га-

за — носителя дополнительного энергии и его сброс в окружающую среду позволяют автоматически поддерживать соответствие выходного давления приложенной к нецилиндрическому поршню силе. При этом также автоматически происходит самоцентрировка поршня относительно кромки сопла в горизонтальной плоскости, благодаря чему отпадает необходимость в применении устройств для вращения поршня вокруг его вертикальной оси.

С другой стороны, задатчики с нецилиндрическим поршнем в отличие от манометров с цилиндрическим поршнем весьма чувствительны к вертикальному перемещению поршня относительно кромки сопла, что приводит к существенному изменению зазора между поршнем и кромкой сопла, а следовательно, и эффективной площади поршня. В принципе, согласно (3.36) постоянство эффективной площади может быть достигнуто при условии

$$\frac{G \cdot v}{p \cdot F_c} \cdot \cos \alpha = \text{const},$$

но при этом каждому значению задаваемого давления  $p$  соответствуют свой массовый расход  $G$  и скорость истечения газа  $v$ . Указанное может быть реализовано при применении автоматических регуляторов расхода газа, но это приводит к возникновению дополнительных погрешностей, связанных с расчетом необходимой регулировочной характеристики.

Помимо отмеченного, задатчики давления с нецилиндрическим поршнем уступают манометрам с цилиндрическим поршнем по универсальности, область их применения по принципу действия ограничена заданием давления; ограничены также и верхние пределы измерений. В настоящее время (см. табл. 9) принцип нецилиндрического поршня нашел применение в образцовых задатчиках давления воздуха (газа) классов точности 0,02–0,1 с верхними пределами измерений от 0,1 до 600 кПа.

### 3.5. Перспективы развития поршневых манометров

Перспективы развития поршневых манометров тесно связаны с общим развитием науки и техники. Здесь, в первую очередь, следует отметить достижения в создании новых материалов поршневых пар, повышающих точность их изготовления, прочностные характеристики и износостойкость, а также достижения в развитии микроэлектроники, представляющие новые возможности автоматизации поршневых манометров.

Повышение качества изготовления поршневых пар — одна из важнейших задач в развитии поршневой манометрии. Применение в качестве материалов поршневых пар сверхтвердых сплавов на основе карбида вольфрама, прочностные характеристики которых (твердость, модуль упругости) существенно выше, чем у обычно применяемых легированных сталей, а температурный коэффициент линейного расширения ниже, позволяет соответственно снизить влияние измеряемого давления и температуры на постоянство эффективной площади поршня и ее стабильность в период эксплуатации манометра. При этом зазор уменьшается

до 0,1–0,3 мкм, что обеспечивает идеальную цилиндрическую форму поверхностей поршневой пары, а следовательно, возможность определения эффективной площади поршня абсолютным (фундаментальным) методом по результатам измерений диаметров поршня и цилиндра с эталонной точностью ( $\delta_F < 0,001\%$ ). Указанная точность в сочетании с методами непосредственного сличения эталонов делает реальным уже в ближайшие годы создание эталонов давления с погрешностью измерений менее 0,0005 %.

Совершенствование технологии изготовления поршневых пар развивается также в направлении создания манометров с наборами поршневых пар с различной эффективной площадью, имеющих заданные номинальные значения, которые позволяют при применении одного и того же комплекта грузов получать различные диапазоны измерений. При изготовлении таких поршневых пар необходимы прецизионные круглошлифовальные станки с программным управлением, обеспечивающие обработку поршней и цилиндров с погрешностью менее 1 мкм. Наиболее последовательно указанное направление развивает фирма „Desgranges & Huot” (Франция), которая изготавливает манометры с взаимозаменяемыми поршневыми парами, имеющими эффективные площади 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 см<sup>2</sup>, что позволяет на одном манометре проводить измерения в девяти различных диапазонах.

Развитие электронной техники и, в частности, выпуск в обращение высокоточных электронных весов привели к созданию поршневых манометров с цифровым отсчетом, позволяющих непосредственно измерять давление во всем диапазоне без применения грузов. Сочетание стабильности поршневой пары, преобразующей измеряемое давление в силу, с эксплуатационными удобствами электронных весов, представляющими результат измерения на цифровое табло, позволяет перевести поршневую манометрию на качественно новый уровень — автоматизированный. Применение микропроцессорной техники дает возможность учитывать влияние температуры и местного ускорения свободного падения, отклонение действительной площади поршня от номинального значения, а также получать результаты измерений в требуемых единицах давления.

Измерительная система манометра (рис. 31) содержит поршневую пару, состоящую из взаимно притертых поршня 1 и цилиндра 2; электронные весы 9 с цифровым отсчетом и устройство для сопряжения поршневой пары с весами, в которую входит распорка 6, шарнирно связанная шарами 5 и 7 с поршнем и присоединительным гнездом электронных весов. В связи с необходимостью вращения поршня вокруг его оси во время измерений между поршнем 1 и шариком 5 помещен опорный шариковый подшипник 4. Таким образом, по принципу действия измеряемое давление поршневой парой преобразуется в силу, которая определяется по показаниям цифровых весов. Предусмотрена комплектация манометра сменными поршневыми парами с эффективной площадью от 10 до 0,02 см<sup>2</sup>, что позволяет измерять давления в диапазонах от 0–60 кПа до 0–30 МПа. Погрешность измерений, определяемая погрешнос-



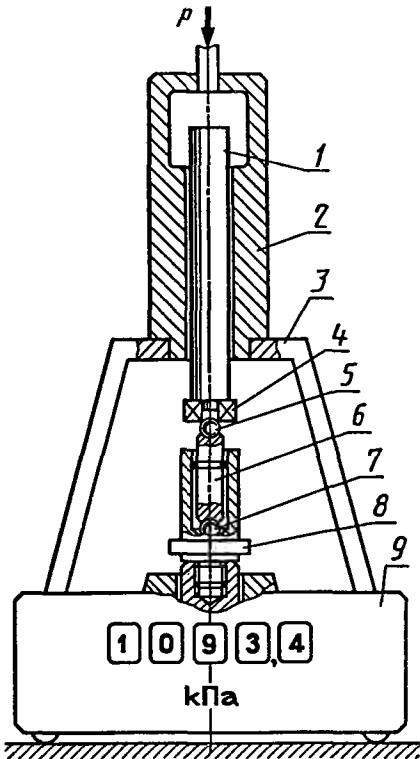


Рис. 31. Цифровой поршневой манометр

тями поршневой пары и электронных весов, составляет  $\delta_p = 1 \times 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-5} p_{\max}/p$ , где  $p$  — измеряемое давление;  $p_{\max}$  — верхний предел измерений.

Как видно из формулы, при  $p \geq 0,5 p_{\max}$  погрешность измерений  $\delta_p \leq 0,02\%$ , что соответствует требованиям к образцовым манометрам 1-го разряда.

Помимо удобств, связанных с цифровым отсчетом давления без необходимости наложения грузов, электронные весы имеют стандартный выходной сигнал на системы автоматизации и обработки результатов измерений. Следует, однако, отметить, что электронные весы требуют периодического контроля, для проведения которого поршневая пара со стойкой 3 отсоединяется от весов, а на кольцевой выступ 8 подпятника весов накладываются специальные калибровочные грузы. Тем не менее, перспективность данного принципа действия для дальнейшего развития поршневых манометров очевидна.

Далеко не исчерпаны возможности дальнейшего развития автоматизированных датчиков давления. Помимо повышения качества изготовления поршневых пар как цилиндрических, так и нецилиндрических, необходимо отметить следующие первоочередные направления: повышение уровня автоматизации датчиков и, в частности, автоматическое введение поправок; расширение диапазона измерений датчиков с нецилиндрическим поршнем с переходом на жидкость в качестве рабочей среды.

## Глава 4. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ МАНОМЕТРЫ

По мере развития промышленности, особенно в связи с появлением паровых машин и железных дорог, потребовались более удобные, чем жидкостные манометры приборы.

Первый деформационный манометр с трубчатым чувствительным элементом был изобретен случайно. Рабочий, при изготовлении змеевика для дистилляционного аппарата, сплющил поперечное сечение цилиндрической трубки, изогнутой по спирали. Тогда, чтобы восстановить форму трубки, один конец ее заглушили,

а в другой конец насосом дали давление воды. При этом часть трубки с деформированным сечением приняла цилиндрическую форму, а спираль на этом участке разогнулась. Этот эффект был использован немецким инженером Шинцем, который в 1845 г. применил трубчатый чувствительный элемент для измерения давления. Эту дату и принято считать днем рождения деформационных манометров, хотя идея создания деформационного барометра – анероида еще в 1702 г. была предложена немецким философом и математиком Лейбницем (1646–1716 гг.), а патент на него получен Види в 1844 г. Промышленное производство трубчатых деформационных манометров было организовано французским фабрикантом Бурдоном, получившим в 1849 г. патент на изобретение одновитковой трубчатой пружины, именем которого она до сих пор часто называется („Бурдоновская трубка“). В 1850 г. Кримавери и Шеффер изобрели мембранный манометр, а несколько позже в 1881 г. Клейманом получен патент на сильфонный манометр.

Простота и компактность деформационных манометров, возможность их применения в различных условиях эксплуатации очень быстро поставили их на первое место в технике измерения давления практически во всех отраслях народного хозяйства.

Диапазон измерений деформационных манометров охватывает почти 10 порядков, простираясь от 10 Па (1 мм вод.ст.) до 1–2 ГПа (более 10000 кгс/см<sup>2</sup>). При этом достигается высокая точность измерений, в отдельных случаях погрешности измерений не превышают 0,02–0,05 %.

#### **4.1. Основные принципы преобразования давления деформационным манометром**

Принципиальное отличие деформационных манометров от жидкостных и поршневых состоит в применении упругого чувствительного элемента (УЧЭ) в качестве первичного преобразователя давления. Чувствительный элемент, воспринимающий измеряемое давление, представляет собой упругую оболочку, которая обычно выполняется в форме тела вращения, причем толщина стенки оболочки существенно меньше ее внешних размеров. Под действием измеряемого давления упругая оболочка деформируется так, что в любой точке оболочки возникают напряжения, уравновешивающие действующее на нее давление.

Понятие „деформационный манометр” в общем виде может быть сформулировано следующим образом. **Деформационный манометр** – манометр, в котором измеряемое давление, действующее на упругую оболочку УЧЭ, уравновешивается напряжениями, которые возникают в материале упругой оболочки. Таким образом УЧЭ преобразует давление, являющееся входной величиной, в выходную величину, несущую измерительную информацию о значении давления. Для УЧЭ естественно выбрать в качестве выходной величины в зависимости от принципа действия деформационного манометра: перемещение заданной точки УЧЭ; напряжение в материале заданной точки и усилие, развиваемое УЧЭ под действием давления.

Выбор того или иного выходного сигнала УЧЭ определяет способы его дальнейшего преобразования для получения результатов измерения давления, а следовательно, и принцип действия деформационного манометра.

В технике измерения давления нашли применение два основных метода: метод прямого преобразования и метод уравнивающего преобразования (рис. 32).

По методу прямого преобразования (рис. 32, а) все преобразования информации о значении давления проводятся в направлении от УЧЭ через

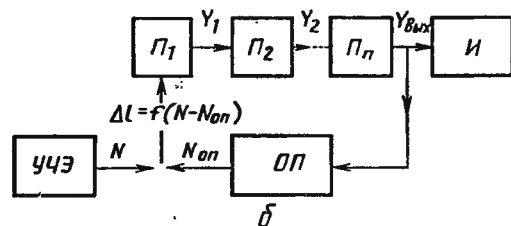
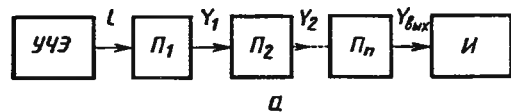


Рис. 32. Методы измерения давления

посредство промежуточных преобразователей  $П_1, П_2, \dots, П_n$  к устройству  $И$ , представляющему результаты измерений давления в требуемой форме. При этом суммарная погрешность преобразования определяется погрешностями всех преобразователей, входящих в измерительный канал.

Метод уравнивающего преобразования (рис. 32, б) характеризуется тем, что используются две цепи преобразователей:

цепь прямого преобразования, состоящая из цепи промежуточных преобразователей  $П_1, П_2, \dots, П_n$ , выходной сигнал которой  $Y_{\text{вых}}$  поступает на указатель результата измерений  $И$  и одновременно на цепь обратного преобразования, состоящей из преобразователя  $ОП$ . Метод уравнивания состоит в том, что усилие  $N$ , развиваемое УЧЭ, уравнивается усилием  $N_{\text{оп}}$ , создаваемым обратным преобразователем  $ОП$  выходного сигнала  $Y_{\text{вых}}$  цепи прямого преобразования. Поэтому на вход последней поступает лишь отклонение заданной точки УЧЭ от положения равновесия. В отличие от предыдущего метода суммарная погрешность преобразования в данном случае почти полностью определяется погрешностью обратного преобразователя. Однако применение метода уравнивания приводит к усложнению конструкции деформационного манометра.

В зависимости от назначения и принципа действия отдельные звенья измерительных цепей деформационных манометров могут конструктивно выполняться в виде самостоятельных блоков. Во многих случаях, например, при жестких эксплуатационных условиях на объекте измерения (повышенная или пониженная температура, высокий уровень вибраций, труднодоступность места подключения и пр.) целесообразно свести к минимуму количество звеньев, находящихся непосредственно на объекте. Конструктивная совокупность этих измерительных элементов с обязательным включением в нее УЧЭ называется датчиком. В то же время указатель результата измерений должен находиться в месте с более благоприятными условиями, удобном для наблюдателя. Это же касается и остальной части измерительной цепи. Блочный принцип построения целесо-

образен также и зрением изгибающегося манометров на разных предприятиях при массовом производстве.

В этой связи следует остановиться на часто применяемом понятии „измерительный преобразователь давления” (ИПД). В принципе, ИПД — это составная часть измерительной цепи многих современных деформационных манометров, включающая промежуточный преобразователь с унифицированным выходным сигналом. Поэтому выделение ИПД в самостоятельный раздел нецелесообразно из-за неизбежности повторов при их описании. В то же время ИПД по функциональным возможностям имеет более широкое применение, чем манометры.

#### **4.2. Упругие чувствительные элементы деформационных манометров (УЧЭ)**

Исторически первыми получили развитие деформационные манометры, в которых мерой давления является деформация УЧЭ (перемещение заданной точки его упругой оболочки). Эти манометры широко применяются и в настоящее время благодаря относительной простоте преобразования перемещения в информацию об измеряемом давлении. Вместе с тем, широкое распространение получили деформационные манометры, основанные на непосредственном преобразовании в информацию об измеряемом давлении напряжений (методы прямого преобразования), а также способы силовой компенсации измеряемого давления (методы уравнивания). Однако во всех случаях применяются одни и те же типы УЧЭ. Основные типы УЧЭ: мембраны, мембранные коробки, сильфоны и трубчатые пружины (рис. 33).

Мембрана (рис. 33, а) представляет собой упругую пластину в форме диска, жестко закрепленную по наружному контуру, прогиб которой определяется действующим на нее давлением.

Мембранная коробка (рис. 33, б) состоит из двух гофрированных мембран, герметично соединенных по наружному контуру, что соответственно увеличивает ее прогиб под действием давления.

Сильфон (рис. 33, в) имеет форму тонкостенного цилиндра, боковая поверхность которого гофрирована с целью увеличения его прогиба под действием давления. При большой глубине вытяжки гофр сильфона становится идентичным батарее последовательно соединенных мембранных коробок.

Трубчатая пружина (рис. 33, г) представляет собой тонкостенную трубку, ось которой искривлена по дуге окружности. В отличие от предыдущего трубчатая пружина под действием давления разгибается, а ее свободный конец перемещается по дуге.

В зависимости от назначения и области применения основные типы УЧЭ имеют многочисленные разновидности:

мембраны — плоские тонкостенные и толстостенные, с жестким центром, гофрированные, с предварительным натяжением;

мембранные коробки — сваренные по грибковой схеме, складывающиеся, блоки мембранных коробок;

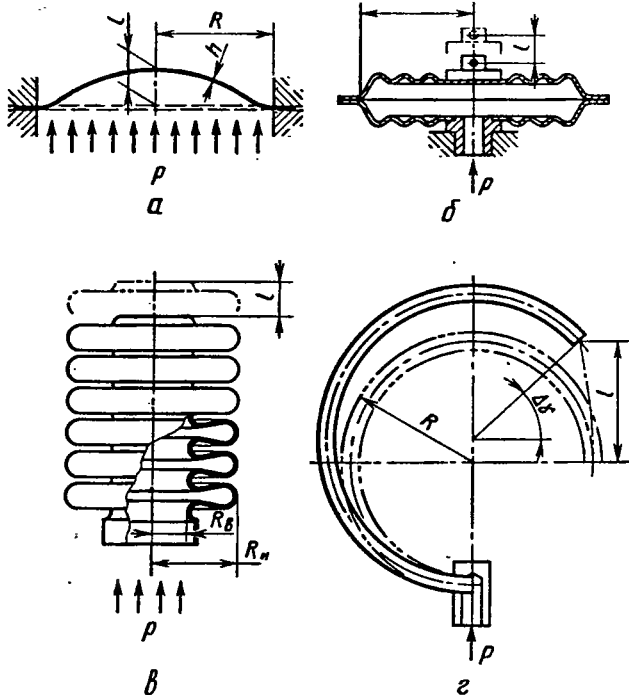


Рис. 33. Основные типы УЧЭ

сифоны — бесшовные, сварные, однослойные и многослойные; трубчатые пружины — одновитковые круговые, многовитковые винтовые и спиральные, S-образные, витые, с эксцентрическим внутренним отверстием.

При преобразовании давления в перемещение основными метрологическими характеристиками УЧЭ являются: упругая характеристика, нелинейность упругой характеристики, чувствительность и жесткость, гистерезис и постоянство упругой характеристики.

Упругой характеристикой называется зависимость между перемещением заданной точки упругого элемента и действующим на него давлением  $l = \varphi(p)$ .

В зависимости от типа и конструкции УЧЭ его упругая характеристика (рис. 34, а) может быть линейной или нелинейной (затухающей или возрастающей). Обычно при изготовлении УЧЭ стремятся к тому, чтобы его упругая характеристика была линейной, так как в этом случае с помощью простого передаточного механизма можно получить линейную по измеряемому давлению шкалу. Однако на практике, особенно при

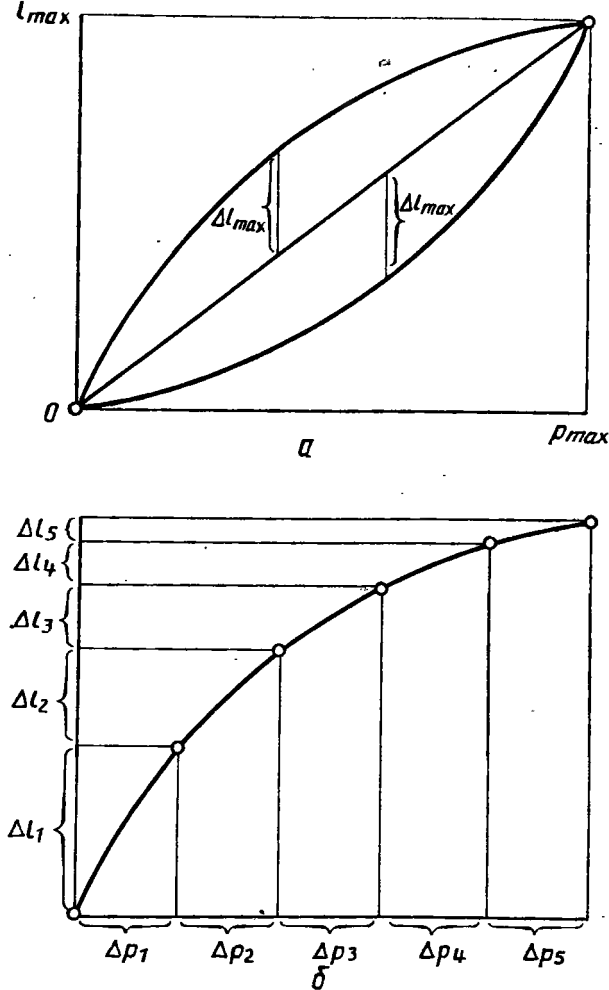


Рис. 34. Характеристики УЧЭ

точных измерениях, всегда наблюдаются отклонения реальной упругой характеристики от линейной характеристики (рис. 34, а). Нелинейность упругой характеристики определяется по формуле  $\eta = \Delta l_{\max} / l_{\max}$ , где  $l_{\max}$  — перемещение заданной точки УЧЭ при его нагружении максимальным рабочим давлением;  $\Delta l_{\max}$  — наибольшее отклонение упругой характеристики от прямой линии, соединяющей начальную и конечную отметки.

Чувствительность, определяемая отношением приращения перемещения заданной точки УЧЭ к соответствующему приращению давления

(рис. 34, б)  $\delta = \Delta l_i / \Delta p_i$ , является одной из важнейших метрологических характеристик. При прочих равных условиях чувствительность характеризует порог реагирования манометра и упрощает измерение размера перемещения.

Величина, обратная чувствительности, называется жесткостью;  $k = \Delta p / \Delta l$

Жесткость во многом определяет динамические свойства УЧЭ. Чем больше жесткость, тем меньше инерционность измерительной системы.

При применении УЧЭ в системах с силовой компенсацией различают два вида жесткости: жесткость по давлению  $k_p$  и жесткость по силе  $k_N$ . Отношение этих величин имеет размерность площади и по аналогии с поршневыми манометрами называется эффективной площадью УЧЭ:  $F_{\text{эф}} = k_N / k_p = N / p$ .

Для нелинейных упругих характеристик эффективная площадь меняется при деформации УЧЭ под действием давления.

Указанные выше рабочие характеристики зависят от типа УЧЭ, его геометрических размеров, упругих свойств материалов и пр. В зависимости от геометрии мембраны (рис. 33, а) могут иметь по давлению как линейную, так и нелинейную упругую характеристики. Наиболее просты по форме плоские мембраны, имеющие затухающую упругую характеристику. Они используются там, где требуется небольшой рабочий ход (тензометрические, индуктивные и емкостные датчики). При незначительных перемещениях упругая характеристика плоской мембраны практически линейная

$$l = \frac{3(1 - \mu^2)}{16} \cdot \frac{R^4}{E h^3} \cdot p, \quad (4.1)$$

где  $R$  — радиус мембраны по внешнему контуру;  $h$  — толщина мембраны;  $E$  — модуль упругости;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Упругая характеристика плоской мембраны с жестким центром при тех же условиях имеет вид

$$l = A_p \cdot \frac{3(1 - \mu^2)}{16} \cdot \frac{R^4}{E h^3} \cdot p, \quad (4.2)$$

где  $A_p = 1 - 1/k^4 - 4 \ln k / k^2$ ;  $k = R / r_0$ ;  $r_0$  — радиус жесткого центра.

В области весьма больших прогибов, когда мембрана работает в основном на растяжение, упругая характеристика определяется кубическим законом

$$l = 1,53R \cdot \sqrt[3]{\frac{R}{E h} \cdot p}. \quad (4.3)$$

Гофрированные мембраны, имеющие в отличие от плоских мембран волнообразный профиль, могут работать при значительно больших прогибах. Причем, в зависимости от формы профиля упругая характеристика мембраны может быть линейной, затухающей или возрастающей по давлению (см. рис. 34).

Эффективная площадь деформированной мембраны с жестким центром может быть определена по приближенной эмпирической формуле

$$F_{\text{эф}} = \frac{\pi}{4} \cdot (R + r_0)^2, \quad (4.4)$$

которая существенно изменяется по мере перемещения жесткого центра мембраны. Однако в условиях силовой компенсации ( $l \approx 0$ ) влияние на эффективную площадь изменения давления значительно меньше.

**Сильфоны** (рис. 33, в) представляют собой осесимметричную трубчатую оболочку и могут совершать под действием давления значительные перемещения, причем его упругая характеристика близка к линейной, а эффективная площадь более постоянна, чем у мембран. Эффективная площадь сильфона приближенно может быть определена по эмпирической формуле

$$F_{\text{эф}} = \frac{\pi}{4} (R_{\text{н}} + R_{\text{в}})^2, \quad (4.5)$$

где  $R_{\text{н}}$ ,  $R_{\text{в}}$  — наружный и внутренний радиусы сильфона, причем ( $R_{\text{н}} - R_{\text{в}}$ ) равно глубине гофра.

Прогиб сильфона, нагруженного давлением, согласно определению понятия эффективной площади  $l = p/k_p = (F_{\text{эф}}/k_N) \cdot p$ .

Жесткость по силе для сильфона

$$k_N = \frac{E \cdot h^3}{2n \cdot A_N \cdot R_{\text{н}}^2}, \quad (4.6)$$

где  $A_N$  — коэффициент, зависящий от относительной глубины гофра;  $k = R_{\text{н}}/R_{\text{в}}$ ;  $n$  — число гофров;  $h$  — толщина стенки сильфона;  $E$  — модуль упругости.

Уравнение упругой характеристики с учетом (4.6) имеет вид

$$l = A_N \cdot n \cdot \frac{k+1}{k} \cdot \frac{R_{\text{н}}^4}{E \cdot h^3} \cdot p. \quad (4.7)$$

В отличие от аналогичного выражения для мембраны (4.1) прогиб сильфона так же, как и блока мембранных коробок, пропорционален числу гофр. Следует отметить, что приведенные выше зависимости не отвечают реальным характеристикам при измерениях высокой точности. В этих случаях они могут быть определены путем экспериментального исследования.

Наиболее распространенным типом трубчатых пружин (рис. 33, г) является одновитковая пружина, ось которой представляет собой дугу окружности с центральным углом  $200-270^\circ$ . Поперечное сечение трубки сплющено в направлении к центру круговой оси трубки, благодаря чему под действием давления, стремящемся вернуть сечению трубки форму круга, наружные слои трубки растягиваются, а внутренние — сжимаются. При этом поперечные сечения трубки поворачиваются против часовой стрелки, трубка разгибается, а ее конец соответственно смещается.



Относительный угол поворота конца трубчатой пружины под действием давления

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \cdot \frac{\alpha}{\beta + x^2} \cdot \frac{R^2}{bh^2} \cdot p, \quad (4.8)$$

где  $\gamma$  — центральный угол оси трубки;  $R$  — радиус оси изгиба трубки;  $a$  и  $b$  — большая и малая полуоси поперечного сечения;  $h$  — толщина стенки трубки;  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, зависящие от отношения полуосей  $a/b$ ;  $x = R \cdot h/a^2$  — главный параметр трубчатой пружины.

Перемещение конца трубчатой пружины

$$l = T \cdot R \frac{\Delta\gamma}{\gamma}, \quad (4.9)$$

где  $T$  — коэффициент, зависящий от центрального угла.

Отличительная особенность трубчатых пружин — весьма широкий диапазон измеряемых давлений, ограниченный прочностью материала УЧЭ, при относительно небольших тяговых усилиях и высокой чувствительности.

Основным критерием качества УЧЭ является точность, с которой измеряемое давление преобразуется в перемещение или силу. К основным источникам погрешностей УЧЭ относятся: несовершенство упругих свойств материала, из которого изготовлен УЧЭ, влияние изменений температуры на модуль упругости и линейные размеры.

Несовершенство упругих свойств проявляется как гистерезис, упругое последствие, релаксация напряжений и ползучесть. Эти явления связаны с возникновением в материале нагруженного УЧЭ микропластических деформаций, которые возрастают с ростом напряжений. При этом увеличение предела упругости материала, как правило, снижает микропластические деформации. Поэтому УЧЭ должен иметь верхний предел измерений давления существенно меньший, чем давление, при котором он полностью или частично теряет свои рабочие свойства. Обычно коэффициент запаса принято определять по отношению напряжений, возникающих в материале при максимальном давлении, к пределу упругости или текучести  $n_\sigma = \sigma_{\text{пр}}/\sigma$ , где  $\sigma$  — максимальное рабочее напряжение.

При точных измерениях коэффициент запаса принимают равным  $n_\sigma = 5-10$ .

Гистерезис проявляется в разности значений перемещений УЧЭ при обратном и прямом ходах его нагружения, при одних и тех же значениях давления (рис. 35, сплошная линия). Если на верхнем пределе упругой характеристики давление некоторое время поддерживается постоянным, то проявляется упругое последствие, которое деформирует петлю гистерезиса (рис. 35, штриховая линия). Однако оба эти явления обратимы: после снятия нагрузки с течением времени УЧЭ возвращается в нулевое положение. В отличие от них ползучесть материала, которая протекает при относительно больших напряжениях и температурах, приводит со временем к необратимым пластическим деформациям.

Другой важный источник погрешностей — влияние температуры на упругие свойства и линейные размеры УЧЭ.

Изменение модуля упругости при изменении температуры выражается формулой  $E_t = E_0 [1 - \gamma_E (t - t_0)]$ , где  $E_0$  — модуль упругости при температуре  $t_0$ ;  $E_t$  — модуль упругости при температуре  $t$ ;  $\gamma_E$  — температурный коэффициент изменения модуля упругости.

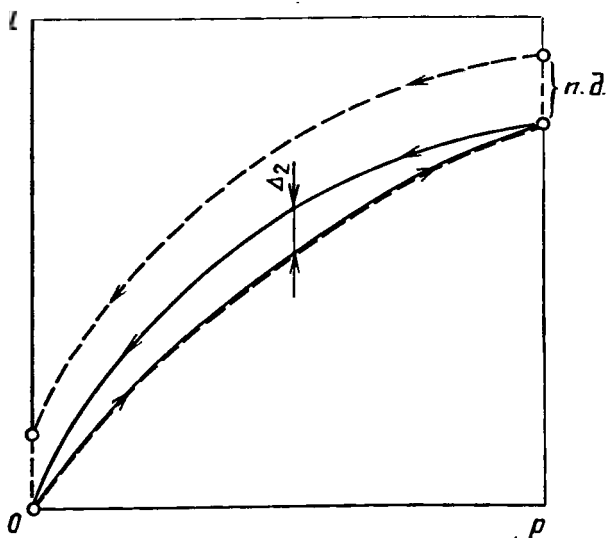


Рис. 35. Гистерезис

Учитывая, что  $\gamma_E = (3-5) \cdot 10^{-4} ^\circ\text{C}^{-1}$ , а температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha = (0,1-0,2) \cdot 10^{-4} ^\circ\text{C}^{-1}$ , влиянием температуры на линейные размеры во многих случаях можно пренебречь.

В заключение следует еще раз отметить, что несмотря на совершенствование методов расчета УЧЭ (развитие общей теории тонкостенных оболочек вращения, численные методы расчета с применением ЭВМ) они не позволяют проводить градуировку абсолютным методом.

Все расчетные методы основаны на упрощенных идеальных моделях формы УЧЭ и условиях их нагружения, что обуславливает приближенность полученных решений (5–10 %). К этому необходимо добавить неизбежный разброс основных параметров УЧЭ при их изготовлении. Метрологические характеристики УЧЭ и основанных на них манометров определяются путем сличения с образцовыми средствами измерений соответствующей точности. Поэтому любой деформационный манометр, в отличие от поршневых и жидкостных манометров, является относительным прибором по принципу действия.

Вместе с тем расчетные зависимости оказывают неоценимую помощь при проектировании и изготовлении деформационных манометров.

#### 4.3. Манометры со свободным перемещением УЧЭ

В данном разделе рассматриваются деформационные манометры, в которых УЧЭ преобразует давление в перемещение его заданной точки (жесткий центр, наконечник трубчатой пружины и пр.). Затем указанное перемещение посредством передаточно-множительного механизма преобразуется в удобную для потребителя форму информации об измеряемом давлении, как правило, перемещение указателя относительно шкалы или пера самописца относительно диаграммы.

Наиболее распространенным манометром этого типа является деформационный манометр с одновитковой трубчатой пружиной (рис. 36). Из-

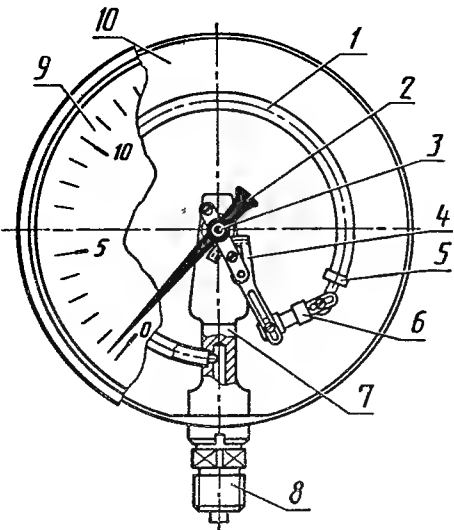


Рис. 36. Деформационный манометр с одновитковой трубчатой пружиной

мерительная система манометра содержит одновитковую трубчатую пружину 1, один конец которой герметично соединен с держателем 7, а на другой конец с наконечником 5 смонтирована тяга 6, которая шарнирно соединена с зубчатым сегментом 4. Перемещение наконечника трубчатой пружины преобразуется во вращение оси стрелочного указателя 2 с помощью насаженной на ось трубки 3 указателя, находящейся в зацеплении с зубчатым венцом сегмента 4. При возрастании давления, подаваемого внутрь трубчатой пружины, последняя разгибается, и стрелочный указатель поворачивается по часовой стрелке относительно шкалы 9, нанесенной на циферблат, закрепленный на корпусе 10 манометра.

Для корректировки угла поворота указателя относительно шкалы длины плеч шарнирно-рычажного механизма, состоящего из тяги 6 и зубчатого сегмента 4, юстируются зажимными винтами. Штуцером 8 манометр присоединяется к источнику давления.

В зависимости от требуемой точности измерений и назначения степень сложности передаточного механизма и габаритные размеры манометра варьируются в широких пределах. Например, для обеспечения требуемой точности отсчета длина шкалы манометров типа МО классов 0,15–0,25 составляет не менее 500 мм при диаметре корпуса 250 мм, в то время как у манометров классов 2,5–4 диаметр корпуса равен 40–60 мм. Для устранения люфта зубчатой передачи на оси стрелки монтиру-

ются натяжные спиральные пружинки. В наиболее точных приборах предусмотрены меры по частичной компенсации влияния температуры. Существенно также различаются требования к качеству изготовления деталей и материалам УЧЭ.

Для удовлетворения потребностей народного хозяйства страны отечественная приборостроительная промышленность ежегодно выпускает около 10 млн. общепромышленных манометров с трубчатой пружиной классов точности 0,6; 1,0; 1,6; 2,5 и 4 с верхними пределами измерений от 0,1 до 100 МПа, а также десятки тысяч образцовых деформационных манометров и вакуумметров типов МО и ВО классов точности 0,15; 0,25 и 0,4 с верхними пределами измерений от  $-0,1$  до  $+60$  МПа.

Отличительная особенность манометров МО и вакуумметров ВО состоит в использовании „условной шкалы”, отметки которой соответствуют не единицам давления („именованная шкала”), а условным единицам, причем одна условная единица равна цене деления шкалы. Шкала манометров МО классов 0,15 и 0,25 содержит 400 условных единиц, класса 0,4 — 250 условных единиц (делений). Поэтому для каждого манометра при градуировке составляются таблицы, в которых на поверяемых отметках указано давление и соответствующее ему число условных единиц (отметок шкалы). Градуировка производится отдельно: при повышении и понижении давления. Показания на промежуточных отметках отсчитываются путем интерполяции. Манометры предназначены для измерений при температуре окружающей среды от  $5$  до  $40^{\circ}\text{C}$ . В результате измерений вводится температурная поправка  $\Delta p_t = \gamma_E p \times X (20^{\circ}\text{C} - t)$  или  $\delta_{p_t} = \gamma_E (20^{\circ}\text{C} - t)$ , где  $\gamma_E = (3-5) \cdot 10^{-4} 1^{\circ}\text{C}^{-1}$  — температурный коэффициент модуля упругости материала трубчатой пружины.

Для манометров МО классов 0,15 и 0,25 с верхними пределами измерений от 0,1 до 2,5 МПа  $\gamma_E = 4 \cdot 10^{-4} 1^{\circ}\text{C}^{-1}$ , от 4 до 60 МПа  $\gamma_E = 3 \times 10^{-4} 1^{\circ}\text{C}^{-1}$ , что при изменении температуры на  $10^{\circ}\text{C}$  соответственно составляет 0,4 и 0,3 %. Манометры снабжены корректором нулевого положения стрелки. Дополнительная погрешность после введения температурной поправки составляет  $\pm 0,25\delta_{p_t}$  (0,1 и 0,075 % соответственно).

Широкое применение, особенно при измерении относительно небольших давлений (менее 1 МПа), находят также мембранные манометры. Одна из типичных конструкций деформационных манометров с мембранным УЧЭ представлена на рис. 37. Манометр содержит гофрированную мембрану 9, герметично закрепленную между фланцами 8 и 10, жесткий центр 7 которой шарнирно соединен с тягой 6. Перемещение мембраны под действием давления, подаваемого через штуцер фланца 10, шарнирно-рычажным механизмом и зубчатым сегментом 4 с трубкой, насаженной на ось 3, преобразуется в угловое вращение стрелки 2 относительно шкалы, нанесенной на циферблат 11, который смонтирован на корпусе 5 манометра. Передаточный механизм и стрелка монтируются на жестко связанную с корпусом стойку 1.

Отличительная особенность конструкции манометра — защита мембраны УЧЭ от перегрузок давлением, благодаря ограничению перемеще-

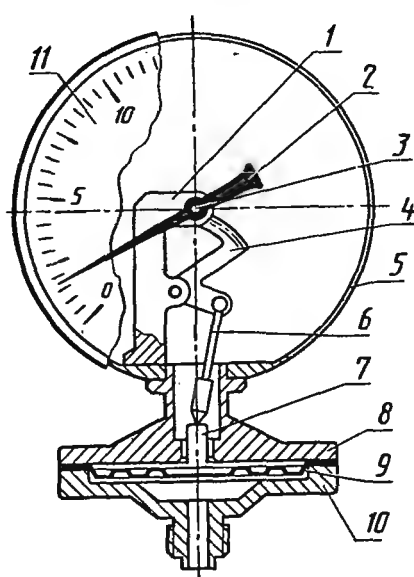


Рис. 37. Деформационный манометр с мембранным УЧЭ

ния мембраны плоской поверхностью фланца 8. Преимущество мембранных манометров — хорошая стабильность нулевого положения стрелки при изменениях температуры окружающей среды. Однако любая мембрана, в том числе и гофрированная, обладает приемлемой линейностью при относительно небольшом рабочем ходе, соизмеримым с толщиной мембраны. Поэтому в манометрах этого типа применяются передаточные механизмы с большим передаточным отношением, точность которых во многом определяет метрологические характеристики манометров.

Для измерения атмосферного и абсолютного давления воздуха в метеослужбе широко используются приборы с УЧЭ, в которых применяются мембранные коробки и блоки последовательно соединенных мембранных коробок

для увеличения рабочего хода УЧЭ. Например, в барометре типа М-98 в качестве УЧЭ применен блок, состоящий из двух последовательно соединенных коробок. Перемещение жесткого центра блока с помощью шарнирно-рычажного механизма преобразуется во вращательное движение стрелки относительно шкалы. В отличие от передаточных механизмов с зубчатым зацеплением для вращения стрелки (см. рис. 36 и 37) в барометре М-98 стрелка вращается шарнирно-пластинчатыми цепочками и роликом, закрепленным на оси стрелки. Для снятия механического трения в шарнирах предусмотрен вибратор, питаемый от сети переменного тока.

Диапазон измерений барометра М-98 от 400 до 1080 гПа (300 — 810 мм рт.ст.), погрешность измерений не более  $\pm 1,5$  гПа ( $\pm 1$  мм рт.ст.), что соответствует 0,15 % верхнего предела измерений. Шкала барометра именованная (мм рт.ст.), однако как и для манометров МО класса 0,15 необходима индивидуальная градуировка каждого барометра с целью определения шкаловых поправок. Барометр предназначен для эксплуатации при температурах окружающего воздуха от  $-20$  до  $+50^\circ\text{C}$ , при этом в его показания вводится температурная поправка  $\Delta B_t$ , зависящая как от температуры окружающей среды, так и от измеряемого давления  $B$ :  $\Delta B_t = k \cdot t + \gamma(750 - B)(t - 20^\circ\text{C})$ , где  $t$  — температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ;  $B$  — атмосферное давление, мм рт.ст.;  $k$  — температурный коэффициент,  $^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\gamma$  — коэффициент компенсации,  $^\circ\text{C} \cdot \text{мм рт.ст.}$

В зависимости от качества выполнения температурной компенсации  $k \leq \pm 0,15$  мм рт.ст./°C (0,02% на 1°C);  $\gamma = (1-5) \cdot 10^{-4}$  °C<sup>-1</sup> · мм рт.ст.

Один из простейших путей совершенствования передаточных механизмов состоит в замене шарнирных соединений типа ось-втулка, обуславливающих механическое трение, а следовательно, и связанное с ним ухудшение вариации показаний и порога реагирования на упругие шарниры. К приборам этого типа относится деформационный манометр с мембранной коробкой типа FA-141 фирмы „Wallance & Tiernan” (ФРГ). Манометр содержит мембранную коробку, тягу с противовесом, упругий шарнир, зубчатый сегмент, трубку, насаженную на ось стрелочного указателя, натяжную пружину с регулировочной головкой и штуцер, которые смонтированы на плате корпуса манометра. Манометр снабжен также дополнительным штуцером для подачи в герметичный корпус опорного давления, которое зависит от вида измеряемого давления (избыточное и абсолютное, разность давлений).

Разность давления внутри мембранной коробки, подаваемого через штуцер, и в корпусе вызывает линейное перемещение жесткого центра мембранной коробки, которое тягой и зубчатым сегментом, находящимся в зацеплении с трубкой, преобразуется в угловое перемещение стрелочного указателя относительно шкалы манометра. Передаточный механизм, за исключением опоры вращения оси стрелки, содержит упругие направляющие, что дает минимальные потери на трение. Натяжная пружина, обеспечивая постоянный контакт между сопрягающимися элементами передаточного механизма, позволяет с помощью регулировочной головки производить точную установку стрелки на нулевую отметку шкалы.

Манометром измеряют абсолютное давление (корпус манометра при этом откачивается), избыточное давление (корпус сообщается с атмосферным давлением) и разность давлений, большее из которых подается внутрь мембранной коробки, а меньшее — в корпус манометра. При измерении разрежения (отрицательного избыточного давления), наоборот, атмосферное давление подается внутрь мембранной коробки, а разрежение — в корпус манометра. Во всех случаях избыточное давление в корпусе манометра не должно превышать 0,1–1 МПа (в зависимости от модификации манометра она указывается на циферблате). Корпус манометра снабжен защитным клапаном, который автоматически отключает корпус от источника давления при достижении предельно допустимой величины.

Наибольшая точность достигнута манометрами серии 1500 (погрешность измерений не более 0,066 % верхнего предела измерений). Это в два раза лучше, чем точность отечественных образцовых манометров типа МО класса 0,15. Следует, однако, отметить, что обеспечивая по принципу действия измерения в диапазоне малых давлений (до 0–15 гПа), мембранные манометры при давлениях свыше 2–5 МПа становятся менее чувствительными, чем манометры типа МО с трубчатой пружиной.

Использование корпуса манометра для подвода на УЧЗ меньшего давления для измерения разности давлений, как это сделано в маномет-

рах типа FA-141, ограничено небольшими давлениями (менее 1 МПа), так как при увеличении статического давления резко возрастают требования к прочности корпуса и смотрового стекла. Иногда для измерения разности давлений применяют два УЧЭ, в каждый из которых подается свое давление  $p_1$  и  $p_2$ .

В дифференциальном манометре типа 001 фирмы „Wika“ (ФРГ) в качестве УЧЭ применены две трубчатых пружины, одна из которых сообщает вращение стрелке относительно основной шкалы, вторая — вращение дополнительной шкалы относительно основной. Это позволяет одновременно измерять  $p_1$  и  $p_2$ , а также их разность  $\Delta p = p_1 - p_2$ . Однако указанным способом нельзя достигнуть высокой точности измерений, особенно при больших статических давлениях ( $p_1$  и  $p_2$ ). Погрешность манометра типа 001 при измерении  $p_1$  и  $p_2$  составляет 2,5 % верхнего предела измерений, а погрешность измерения разности резко возрастает по мере ее уменьшения по сравнению с  $p_1$  и  $p_2$ . Указанное относится ко всем приборам с механическими преобразователями перемещения УЧЭ во вращательное движение стрелки при измерении разности давлений при высоких статических давлениях.

#### \* Контрольный вопрос № 6

Влияет ли вид измеряемого давления — абсолютное и избыточное, разность давлений — на принципиальную схему и конструкцию деформационного манометра?

Если „да“ — см. с. 92, если „нет“ — см. с. 96.

В последние десятилетия все большее распространение стали находить методы преобразования перемещения УЧЭ, основанные на измерении электрических величин, и, прежде всего, электромагнитные и электростатические преобразователи, а также реостатные преобразователи и др.

В технике измерения давления находят применение индуктивные и трансформаторные (взаимоиндуктивные) электромагнитные преобразователи.

Индуктивными преобразователями называются преобразователи, преобразующие перемещение в изменение индуктивности магнитной цепи. Принцип действия преобразователя заключается в следующем (рис. 38). Преобразователь содержит (рис. 38, а) магнитопроводы 1 и 2 с катушками  $Z_1$  и  $Z_2$ , между которыми помещен жесткий центр 3 мембраны. Катушки питаются напряжением переменного тока и включены в индуктивный мост, два дополнительных плеча которого составляют постоянные сопротивления  $Z_3$  и  $Z_4$ . В равновесном положении мост сбалансирован и сила тока  $I_K$  в диагонали моста равна нулю. При воздействии на мембрану давления жесткий центр сместится, что приведет к увеличению магнитного сопротивления магнитопровода 1 и уменьшению сопротивления магнитопровода 2, а вместе с тем и их полных электрических сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$ . В результате разбаланса моста по диагонали последнего потечет ток  $I_K$ , пропорциональный перемещению центра мембраны, а следовательно, давлению.

Рис. 38. Принцип действия индуктивного преобразователя

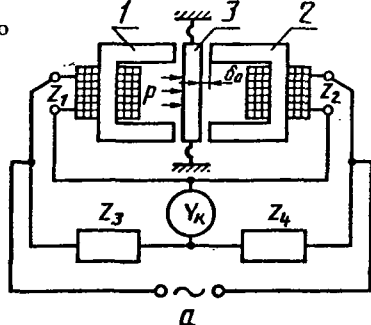
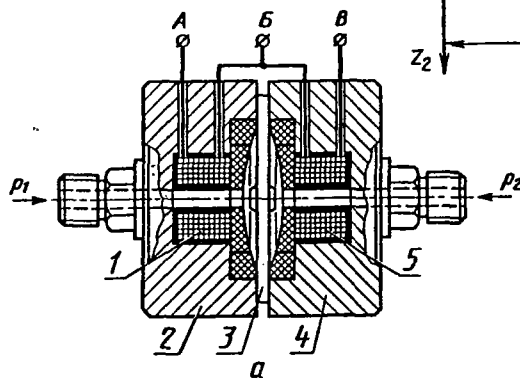
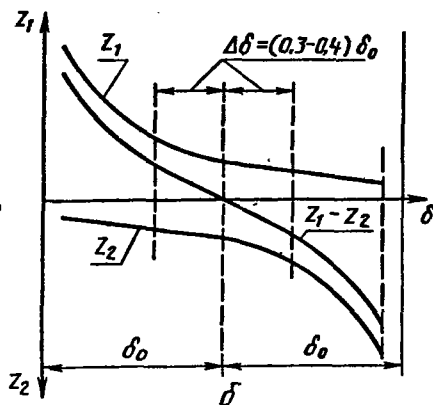
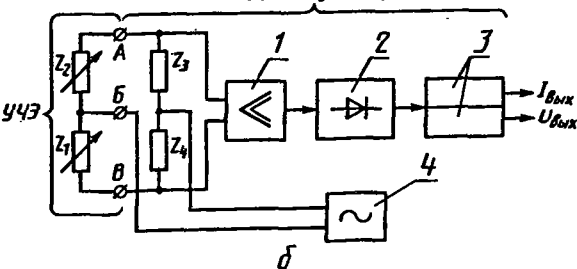


Рис. 39. Схема дифференциального датчика разности давлений фирмы „Hartman & Braun”



Демодулятор





Электрическое сопротивление каждой из катушек связано с перемещением  $\delta$  гиперболической зависимостью (рис. 38, б), которая имеет ярко выраженный нелинейный характер:  $Z_1 = f_1(\delta)$  и  $Z_2 = f_2(\delta)$ , причем комплексное сопротивление катушек изменяется противофазно. Дифференциальная схема индуктивного преобразователя, выходным параметром которой является разность  $Z_1 - Z_2$ , расширяет линейный участок до  $\Delta\delta = \pm(0,3-0,4)\delta_0$ , а также существенно повышает чувствительность  $\epsilon_Z = \Delta Z/Z$  преобразователя, которая позволяет фиксировать 0,1 мкм по перемещению жесткого центра.

По принципу действия индуктивные преобразователи пригодны для измерения любого вида давления: абсолютного, избыточного и разности давлений. При этом достоинством индуктивных преобразователей является отсутствие механических устройств для вывода выходного сигнала УЧЗ к промежуточным преобразователям, что обуславливает отсутствие потерь на трение в передаточном механизме. Поэтому индуктивные преобразователи пригодны для измерения небольших разностей давлений при высоком статическом давлении с хорошими динамическими характеристиками.

На рис. 39, а представлена конструктивная схема дифференциального датчика разности давлений фирмы „Hartman & Braun” (ФРГ). Датчик содержит включенные противофазно катушки индуктивности 1 и 5, между которыми фланцами 2 и 4 закреплена мембрана 3. Мембрана и фланцы образуют две измерительные камеры, в которые подаются измеряемые давления  $p_1$  и  $p_2$ . Под действием разности давлений  $p_1 - p_2$  мембрана прогибается, изменяя при этом магнитное сопротивление, а следовательно, индуктивности катушек, образующих полумост. При помощи выводов А, Б и В датчик подключается к постоянным сопротивлениям  $Z_3$  и  $Z_4$  демодулятора (рис. 39, б), образуя полный мост, индуктивность которого в диапазоне измерений разности давлений измеряется от 5 до 100 мГн. Измерительная система питается от генератора 4 переменным током частотой 3 кГц. Выходной сигнал моста усиливается фазочувствительным усилителем 1 и преобразуется выпрямителем 2 в выходной ток-овый сигнал  $I_{\text{вых}}$  ( $\pm 3$  мА), поступающий на светопечатающее регистрирующее устройство и аналоговое напряжение  $U_{\text{вых}}$  (0–5 В), которое подается на показывающий вторичный прибор или устройство магнитной записи. Фильтры 3 очищают выходные сигналы от искажений, внесенных при промежуточных преобразованиях.

Фирма выпускает датчики типа EOSE150 для измерения избыточного давления, типа EOSE153 — для измерения абсолютного давления, типа EOSE165 и EOSE70 — для измерения избыточного давления и разности давлений. Технические характеристики датчиков приведены в табл. 10.

#### К контрольному вопросу № 6

Вы ответили правильно. Если при этом Вы особо подчеркнули, что при измерении избыточного давления в манометре достаточно предусмотреть одну измерительную камеру, а при измерении абсолютного давления и разности давлений — две измерительные камеры, то смело можете переходить к изучению следующего материала.

| Техническая характеристика                            | Числовое значение характеристики датчика типа EOSE |                    |                                        |                    |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|--------------------|
|                                                       | 150, 1150*                                         | 153                | 165, 1165*                             | 70                 |
| Верхние пределы измерений, МПа                        | От 0,005<br>до 14                                  | От 0,035<br>до 3,5 | От 21<br>до 42                         | От 0,014<br>до 2,8 |
| Максимальное статическое давление, МПа                | 21                                                 | От 0,07<br>до 7    | 55                                     | 7                  |
| Линейность, %                                         | ±0,2                                               | ±0,25              | ±0,5                                   | ±0,5               |
| Гистерезис и воспроизводимость, %                     | ±0,2                                               | ±0,2               | ±0,5                                   | ±0,5               |
| Диапазон рабочих температур, °С                       | От -40<br>до +80<br>от -60<br>до +200*             | От -40<br>до +80   | От -40<br>до +80<br>от -60<br>до +200* | От -40<br>до +80   |
| Влияние температуры на:<br>стабильность нуля,<br>%/°С | 0,02                                               | 0,04               | 0,02                                   | 0,04               |
| чувствительность,<br>%/°С                             | -0,02                                              | 0,02               | 0,02                                   | 0,02               |
| Габаритные размеры, мм                                | 38×51×68                                           | 38×51×71           | 51×65×78                               | 21×29×52           |
| Масса, кг                                             | 0,14<br>0,37*                                      | 0,17               | 0,50<br>0,78*                          | 0,08               |

\* Корпус и детали датчика изготовлены из нержавеющей легированной стали для работы на агрессивных средах.

Дальнейшая миниатюризация индуктивных датчиков в принципе ограничена размерами катушек. Помимо этого, расположение катушек непосредственно в измерительных камерах приводит к усилению влияния температуры. Несомненными достоинствами индуктивных датчиков являются: простота конструкции, хорошие динамические характеристики, высокие выходные сигналы, долговременная стабильность.

Простейший электростатический преобразователь (рис. 40, а) содержит два электрода в форме плоских пластин, расположенных параллельно относительно друг друга, которые образуют конденсатор. Если одна из пластин имеет возможность перемещаться, то электрическая емкость  $C$  преобразователя обратно пропорциональна расстоянию между пластинами

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{\delta}, \quad (4.10)$$

где  $S$  — площадь пластины;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды, находящейся между пластинами;  $\delta$  — расстояние между пластинами.

Согласно (4.10) мерой перемещения является электрическая емкость, поэтому преобразователи этого типа называются емкостными.

При подключении к преобразователю источника переменного тока через него потечет ток силой

$$I = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \cos \omega t, \quad (4.11)$$

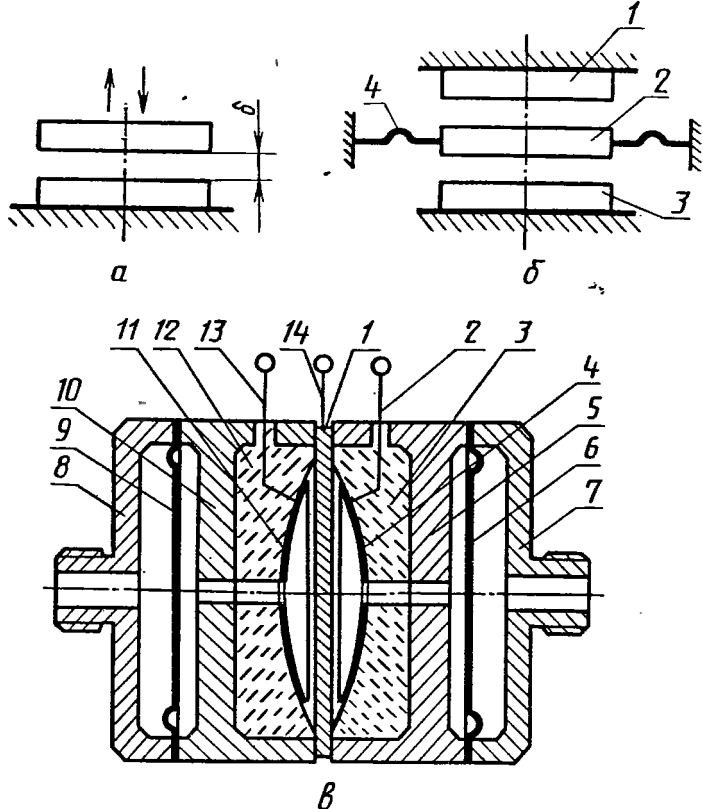


Рис. 40. Электростатический преобразователь

где  $U_m$  — напряжение переменного тока;  $\omega$  — круговая частота.

Так же, как и в индуктивных преобразователях, зависимость между емкостью и перемещением имеет нелинейный характер (гипербола). Для уменьшения нелинейности при измерении малых перемещений (от 1 мкм до 1 мм), как правило, применяются дифференциальные емкостные преобразователи (рис. 40, б). Обкладка 2 закреплена на мембране 4, перемещение которой требуется измерить, обкладки 1 и 3 неподвижны. При перемещении обкладки 2 емкость между обкладками 1 и 2 увеличивается, а между обкладками 2 и 3 уменьшается, или наоборот (в зависимости от направления перемещения).

Дифференциальные емкостные преобразователи отличаются высокой чувствительностью (до 500 В/мм), малыми погрешностями и простотой конструкции, особенно при измерении разности давлений. Зависимость электрического сопротивления преобразователя от перемещения мембраны практически линейна.

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 = \frac{2\Delta\delta}{\omega \cdot \epsilon \cdot S}, \quad (4.12)$$

где  $\Delta\delta$  — перемещение мембраны;  $Z_1$  и  $Z_2$  — электрические сопротивления конденсаторов, образованных неподвижными обкладками и мембраной.

Включением в схему емкостного моста осуществляется дальнейшее преобразование перемещения мембраны в требуемые выходные сигналы.

Данный принцип измерений использован в мембранно-емкостном преобразователе давлений типа ПДД-1-10А, серийно выпускаемом в нашей стране, который комплектуется показывающим вторичным прибором типа ВД-1 с цифровым отсчетом. Одна из измерительных камер преобразователя откачена до достаточного давления менее  $10^{-3}$  Па ( $10^{-5}$  мм рт.ст.), в другую подается измеряемое абсолютное давление. Расстояние между неподвижными обкладками и мембраной составляет 0,1 мм. Цифровое табло вторичного прибора позволяет отсчитывать результаты измерений в двух диапазонах: 1,3—173 Па (0,01—1,3 мм рт.ст.) и 173 Па — 1,33 кПа (1,3—10 мм рт.ст.). Погрешность измерений составляет 5—10 % в зависимости от диапазона, что для области вакуумных измерений обеспечивает высокую точность.

При измерении давления различных сред, в том числе и агрессивных, их попадание в измерительные камеры приводит к неопределенности диэлектрической проницаемости между обкладками преобразователя, что резко снижает точность измерений. В этих случаях емкостный преобразователь изолируется от измеряемой среды разделительными мембранами. Типичным примером реализации данного принципа является емкостный преобразователь типа 1151ДР фирмы „Rosemount Inc”, США (рис. 40, в). Он содержит измерительную мембрану 1, герметично закрепленную между втулками 5 и 10, в которые запрессованы керамические твердые подложки 3 и 12. На внутренние поверхности подложек нанесены тонкопленочные электроды 4 и 11. Измерительные камеры изолированы от среды, давление которой измеряется, разделительными мембранами 6 и 9, имеющими относительно небольшую жесткость и защищенными крышками 7 и 8. Пространство между разделительными и измерительной мембранами заполнено силиконовым маслом, что обеспечивает постоянство диэлектрической проницаемости и предохраняет измерительную мембрану от перегрузок давлением. Мембрана и электроды включаются в мостовую схему с помощью экранированных проводов 2, 13 и 14, выходной сигнал которой путем демоделирования и дальнейших преобразований поступает на показывающие или регистрирующие приборы, а также в системы регулирования и управления в форме унифицированного токового сигнала 4—20 мА.

Преобразователи имеют диапазоны измерений разности давлений от 0—1,25 кПа (0—125 мм вод.ст.) до 0—200 кПа (0—2 кгс/см<sup>2</sup>) при статическом давлении до 14 МПа (140 кгс/см<sup>2</sup>). Совместное влияние нелинейности, гистерезиса и повторяемости приводит к погрешности не более  $\pm 0,2$  %, долговременная стабильность показаний  $\pm 0,2$  % за 6 мес.

К достоинствам емкостных преобразователей можно отнести высокую точность и чувствительность, простоту конструкции, возможность применения при высоких температурах (до  $350^{\circ}\text{C}$ ) и малую инерционность. Однако для обеспечения высокой точности требуются применение генераторов высокой частоты, защита от помех (специальные экранированные кабели, размещение электроники вблизи от преобразователя и пр.). Следует отметить, что эти меры существенно удорожат аппаратуру, необходимую для применения емкостных преобразователей, по сравнению с другими методами.

#### К контрольному вопросу № 6

Вы ошиблись. Еще раз внимательно просмотрите разд. 2.4, а также разд. 1.1.

**Реостатные преобразователи** основаны на изменении активного электрического сопротивления при перемещении заданной точки УЧЭ, которое преобразуется в угловое или линейное перемещение токосъемника по контактной дорожке сопротивления. Недостатком преобразователей этого типа является связанное со взаимным перемещением механическое трение, что существенно ограничивает их точность. Помимо этого, для достижения приемлемой чувствительности требуется относительно большое перемещение УЧЭ, что приводит к существенной нелинейности. Поэтому реостатные преобразователи неприменимы для точных измерений давления.

Большие возможности для точного преобразования перемещения УЧЭ предоставляют оптические методы, а также применение фото-электрических следящих систем, которые осуществляют преобразование с высокой разрешающей способностью, полностью исключая механическое трение в передаточном механизме. Однако манометры этого типа весьма сложны по технологии изготовления и градуировке. Так, фирмой Texas Instr (США) выпускается манометр с УЧЭ, предоставляющим многовитковую винтовую трубчатую пружину, изготовленную из кварца. На оси УЧЭ с помощью проволоочной растяжки закреплено зеркальце, поворот которого при изменении давления отслеживается фото-электрической следящей системой. При этом совмещение последней с положением зеркальца осуществляется электродвигателем, число оборотов вала которого одновременно передается на механический цифровой счетчик, являющийся указателем давления. Высокая разрешающая способность следящей системы позволяет свести погрешность до  $0,015\%$  верхнего предела измерений. При этом, несмотря на использование кварца в качестве материала УЧЭ, необходимо термостатирование последнего. Манометры этого типа предназначены для точных измерений в лабораториях, а также для поверочных работ. Сложность и громоздкость конструкции в сочетании с высокой стоимостью препятствуют их широкому применению.

#### 4.4. Резистивные деформационные манометры

Резистивные манометры основаны на изменении активного электро-сопротивления проводников при их механической деформации. Впервые

этот эффект (тензoeffект) был рассмотрен английским физиком В. Томпсоном (лорд Кельвин) в 1856 г. Экспериментальные исследования тензoeffекта для различных металлов и сплавов были впервые проведены при давлениях до 300 МПа Лизелом (1903 г.), а затем при давлениях до 1300 МПа Бриджменом (1911 г.). Однако широкое внедрение тензоресторной техники в промышленность началось со времен второй мировой войны.

Основная характеристика тензoeffекта — коэффициент относительной тензочувствительности, определяемый как отношение изменения сопротивления проводника к изменению его длины

$$k = \epsilon_R / \epsilon_l, \quad (4.13)$$

где  $\epsilon_R = \Delta R / R$  — относительное изменение сопротивления;  $\epsilon_l = \Delta l / l$  — относительное изменение длины.

Для твердых тел относительное изменение сопротивления зависит как от изменения геометрических размеров, так и от изменения удельного сопротивления

$$k = 1 + 2\mu + m, \quad (4.14)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона (для металлов  $\mu = 0,24-0,4$ );  $m = \Delta \rho / \rho / \Delta l / l$  — изменение удельного сопротивления материала, связанное с изменением его физических свойств.

Для металлов  $(1 + 2\mu) \gg m$ , для полупроводниковых материалов  $m \gg (1 + 2\mu)$ , и для них можно считать, что  $k = m$ .

Принципиальное отличие тензометрического метода измерения давления состоит в том, что мерой давления является не перемещение заданной точки УЧЭ в осевом направлении, а деформации поверхности УЧЭ или поверхности связанного с ним тела. Измерительный преобразователь, который преобразует деформации поверхности твердого тела в изменение его электросопротивления, называется тензорезистором.

Обычно выделяют следующие основные группы тензорезисторов: проволочные, фольговые, тонкопленочные и полупроводниковые. При этом находят применение два основных вида преобразования давления:

давление, воспринимаемое УЧЭ, вызывает деформацию его поверхности (растягивающую или сжимающую), которая преобразуется в изменение электросопротивления тензорезистора;

давление, воспринимаемое УЧЭ, преобразуется в сосредоточенную силу, которая деформирует упругое твердое тело с жестко связанным с ним тензорезистором; иногда производится промежуточное преобразование силы в момент сил.

Аппаратура, содержащая промежуточные преобразователи различного назначения, а также источники питания, усилитель выходного сигнала и вторичные приборы для индикации и регистрации давления, требует существенно больших затрат на изготовление, чем УЧЭ с вмонтированными в него тензорезисторами, которые, как правило, включаются в мостовую схему и составляют вместе с УЧЭ единый блок (датчик).

Тензорезисторы обычно включаются во все четыре плеча мостовой схемы, причем для повышения чувствительности одна пара тензорезисторов работает на растяжение, а другая на сжатие. Иногда два тензорезистора располагаются на участках УЧЭ, подверженных деформации, а два других „холостых” (не подвергаются растяжению или сжатию) предназначены для температурной компенсации мостовой схемы. Для датчиков высокой точности требуются также уравнивающие и компенсационные элементы для корректировки нуля и диапазона измерений и пр.

Первыми были разработаны проволочные тензопреобразователи (проволочные тензорезистивные манометры), предназначенные для измерения высоких давлений, которые в отличие от указанных выше методов преобразования основаны на всестороннем сжатии проводника непосредственно давлением окружающей среды без применения УЧЭ, т. е. функции УЧЭ и тензорезистора совмещены в одном элементе.

В качестве материала проволочного сопротивления до настоящего времени применяется манганин (сплав меди, марганца и никеля), эффективность которого при создании тензоэффекта была выявлена исследованиями Лизела и Бриджмена еще в начале нашего века.

Манганиновый манометр (рис. 41) содержит катушку сопротивления 6, каркас которой с помощью двух металлических стержней 1 прикреплен к втулке 3, и корпус 7 с штуцером для подключения измеряемого давления. Для уплотнения стержней в их средней части имеются кольцевые утолщения, с двух сторон которых помещены прокладки 4. Предварительное уплотнение производится с помощью гайки 2, а затем под действием давления верхние прокладки самоуплотняются. Для электрической изоляции стержней, предназначенных для включения катушки сопротивления в мостовую схему, стержни отделены от металлических деталей воздушными зазорами, которые обеспечиваются центровкой стержней посредством изолирующих втулок 5 и уплотнений 4.

Уравнение измерений манганинового манометра имеет вид

$$p = \alpha \left( -\frac{\Delta R}{R_0} \right) + \beta \left( -\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2, \quad (4.15)$$

где  $R_0$  — сопротивление проводника при отсутствии давления;  $\Delta R$  — изменение сопротивления при давлении  $p$ ;  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, зависящие от свойств материала проводника и, в меньшей степени, от технологии изготовления.

Наиболее часто для изготовления точных манганиновых манометров применяется сплав, состоящий из 84 % меди, 12 % марганца и 4 % никеля. Удельное сопротивление манганина такого состава составляет  $(4,2-4,8) \cdot 10^{-7}$  Ом/м, что в 25 раз превышает удельное сопротивление меди. Это имеет существенное значение в технике высоких давлений, так как непосредственно влияет на размеры катушки сопротивления.

Значения коэффициентов уравнения измерений (4.15) колеблются в пределах:  $\alpha = (40,3-41,2) \cdot 10^9$  Па;  $\beta = (11,5-15,0) \cdot 10^9$  Па. Доля второго члена уравнения (4.15), определяющего нелинейность, составляет от 0,01 % при  $p = 100$  МПа до 0,8 % при  $p = 1$  ГПа ( $10000$  кгс/см<sup>2</sup>),

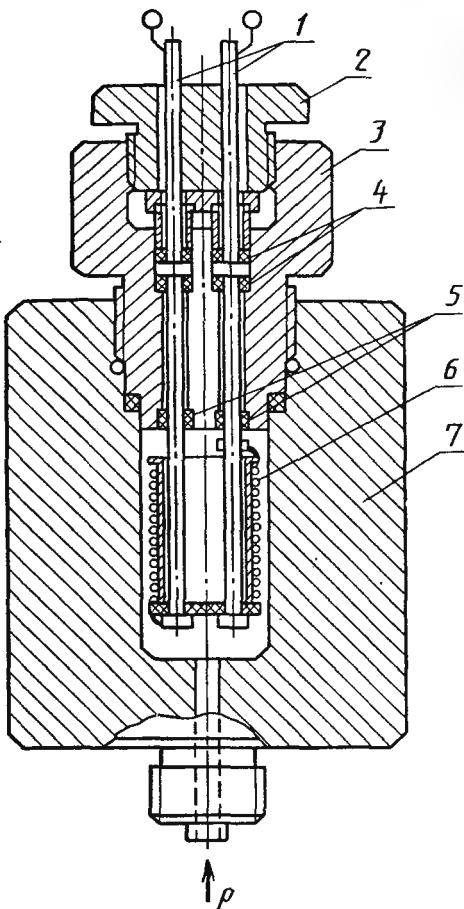


Рис. 41. Манганиновый манометр

резко возрастают при дальнейшем увеличении давления. При точных измерениях с погрешностью менее 0,5–1 % требуется индивидуальная градуировка манганиновых манометров.

Диапазон давлений, измеряемых манганиновыми манометрами, составляет от 100 МПа (1000 кгс/см<sup>2</sup>) до 4 ГПа (40000 кгс/см<sup>2</sup>), погрешность измерений от 0,4 до 2,5 % (рабочие средства измерений) и от 0,2 до 0,6 % (образцовые средства измерений). Долговременная стабильность (5–10 лет) и воспроизводимость показаний хорошо изготовленных манганиновых манометров составляют  $\pm 0,2$  % каждая. Влияние температуры определяется изменением электросопротивления, которое в среднем составляет 0,01 % на 1°С.

Манометры сопротивления практически не применяются при давлениях менее 50 МПа из-за относительно низкого тензoeffекта при всестороннем сжатии проводника. Например, при  $p = 50$  МПа изменение сопротивления манганина составляет  $\Delta R/R_0 = 0,125$  %, что соизмеримо с

влиянием изменения температуры на  $\pm 5^\circ\text{C}$  (0,05 %). Поэтому при измерении малых и средних давлений производится предварительное преобразование давления в деформацию УЧЭ, которая создает в материале тензорезистора требуемые растягивающие или сжимающие усилия. При этом уменьшение давления компенсируется увеличением геометрических размеров УЧЭ и уменьшением толщины его стенок.

На этом принципе основано подавляющее большинство проволочных тензорезистивных манометров. Находят применение как наклеиваемые на поверхность УЧЭ проволочные тензорезисторы, так и „свободные” тензорезистивные преобразователи, в которых деформации подвергаются ненаклеенные проволочные нити. Различаются также манометры



метры с тензорезисторами, закрепленными непосредственно на поверхности УЧЭ и закрепленными на балочке, на которую действует развиваемая под действием на УЧЭ давления сила. Примеры некоторых конструктивных решений приведены на рис. 42.

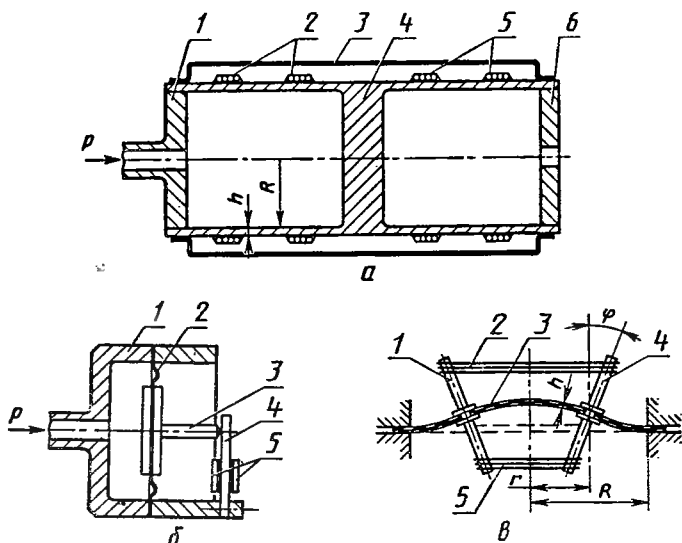


Рис. 42. Проволочные тензорезисторные манометры

Одна из таких конструктивных схем положена в основу тензомодуля преобразователя избыточного давления типа Темп-21ДИ-М1 на основе литых микропроводов. Тензомодуль (рис. 42, а) содержит упругий чувствительный элемент 4, выполненный в форме пустотелого цилиндра с перегородкой в средней части, который на торцах имеет фланцы 1 и 6. Через фланец 1 внутрь УЧЭ подается измеряемое давление, фланец 2 имеет отверстие для сообщения второй половины УЧЭ с атмосферным давлением. На наружной поверхности цилиндра размещены четыре тензорезистора, два из которых, воспринимающие деформацию цилиндра под действием давления, составляют активные плечи моста сопротивлений, а два других 5 — пассивные плечи, предназначенные для температурной компенсации нуля мостовой схемы. Тензорезисторы укреплены на цилиндре с помощью специального цемента и защищены от воздействия окружающей среды герметичным кожухом 3.

Мостовая схема выдает электрический сигнал постоянного тока, который преобразуется в пропорциональное напряжение переменного тока и после усиления вновь преобразуется в токовый выходной сигнал 0—5, 0—20 или 4—20 мА. Электронный блок содержит также масштабный делитель, который позволяет ступенчато изменять коэффициент усиления выходного сигнала мостовой схемы. Благодаря этому один и тот же УЧЭ

охватывает четыре диапазона давлений. Выпускаются три модели преобразователя, которые обеспечивают верхние пределы измерений, МПа:

2160 .... 1,0; 1,6; 2,5; 4,0

2170 .... 6 ; 10; 16; 25

2180 .... 40; 60; 100; 160

Пределы основной допускаемой погрешности составляют 0,25; 0,5 и 1,0 от верхнего предела измерений.

Преобразователь предназначен для работы при температуре окружающего воздуха от  $-30$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ . Габаритные размеры  $130 \times 185 \times 45$  мм, масса не более 1 кг.

Для измерения давлений менее 1 МПа ( $10 \text{ кгс/см}^2$ ) может быть использован тензопреобразователь балочного типа. Преобразователь (рис. 42, б) содержит закрепленную на фланце 1 мембрану 2 с жестким центром, которая преобразует давление в силу, передаваемую благодаря стержню 3 на упругую балку 4. Закрепленные на балке тензорезисторы 5, один из которых испытывает растягивающие напряжения, а другой — сжимающие напряжения, включены в мостовую схему. Возможности данной схемы при понижении диапазона измерений давления в принципе неограничены.

Общий недостаток конструкций с наклеиваемыми проволоочными тензорезисторами — нестабильность закрепления последних на деформируемой поверхности, особенно при воздействии повышенных температур. С этой точки зрения предпочтительнее „свободные” тензорезистивные преобразователи, которые почти полностью совмещают функции упругого элемента и тензорезистора, обеспечивая высокую собственную частоту и хорошую стабильность нуля, так как жесткость других упругих элементов (мембраны, сифона и пр.) в этом случае выбирается существенно меньшей.

Преобразователь указанного типа (рис. 42, в) содержит заземленную по краям мембрану 3, на которой закреплены стержни 1 и 4. На концах стержней смонтированы „свободные” проволоочные тензорезисторы 2 и 5. Под действием разности давлений мембрана деформируется, благодаря чему стержни поворачиваются в разные стороны, увеличивая натяжение одного из тензорезисторов и уменьшая натяжение другого. На выходе мостовой схемы, активными плечами которой являются оба тензорезистора, возникает выходной электрический сигнал, преобразуемый далее обычными способами.

Если стержни закреплены на расстоянии  $r = R/\sqrt{3}$  от центра мембраны, то угол их поворота

$$\varphi = \frac{1 - \mu^2}{6\sqrt{3}} \cdot \frac{R^3}{h^3 E} \cdot p, \quad (4.16)$$

где  $R$  — радиус мембраны;  $h$  — толщина мембраны;  $E$  — модуль упругости материала;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

При жесткости нитей, существенно превышающей жесткость мембраны, поворот стержней практически не происходит вследствие компенсации момента со стороны мембраны моментом сил натяжения нитей.

Следует отметить, что все проволочные тензорезисторы имеют относительно низкие выходные сигналы (по сравнению с индуктивными и емкостными преобразователями).

Одним из существенных недостатков проволочных тензорезисторов является небольшая теплоотдача материала проволоки, так как площадь теплоотдачи составляет половину цилиндрической поверхности проволоки. Поэтому возможности миниатюризации ограничиваются допусаемым уменьшением диаметра проволоки, который обычно составляет не менее 20–30 мкм. Гораздо большие возможности предоставляет техника изготовления тензорезисторов из металлической фольги, которая к настоящему времени достаточно хорошо испытана и отработана. Типичная конструкция фольгового тензорезистора (рис. 43, а) состоит из тонкой

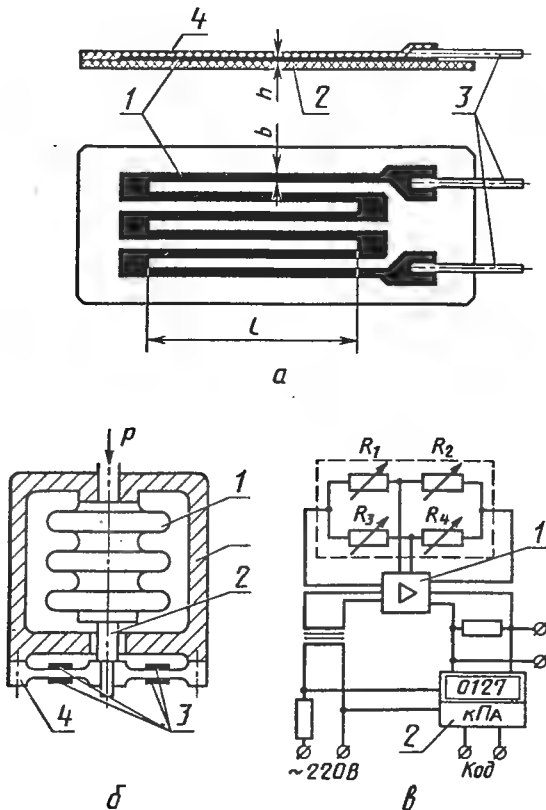


Рис. 43. Фольговый тензорезистор

металлической фольги 1, выполненной в виде петлеобразной решетки, которая специальным клеем закреплена на подложке 2 из изоляционного материала. К расширенным концам решетки припаиваются проволоч-

ные токоъемники 3, а сверху на решетку наносится изоляционное покрытие 4 для защиты от воздействия окружающей среды. Сопротивление резистора определяется базой  $l$ , числом последовательно соединенных полосок фольги и их поперечным сечением. В качестве материала фольги обычно применяют константан, подложки — бакелитовую или эпоксидную смолу. Для изготовления фольговых тензорезисторов и их закрепления на поверхности УЧЭ используются в зависимости от условий работы (температуры, влажности, агрессивности среды) различные клеящие составы, затвердевающие в горячем состоянии.

Толщина  $h$  фольги обычно составляет 3–10 мкм, а ширина  $b = 0,1$  мм и более. Поэтому по сравнению с проволочными тензорезисторами во много раз увеличивается теплоотдача, а, следовательно, уменьшается нагрев тензорезистора при прочих равных условиях. Коэффициент тензочувствительности составляет  $k = 2,1\text{--}2,3$  (для константана). Размеры тензорезисторов могут быть доведены до  $l = 2\text{--}3$  мм.

Тензорезисторы закрепляются непосредственно на поверхности УЧЭ или на упругую балочку, связанную с УЧЭ жестким стержнем, и включаются в мостовую схему. Манометры, основанные на указанном принципе, позволяют измерять давление с высокой точностью. Так, цифровой манометр „Diptron 2” фирмы „Wallance & Tiernan” (ФРГ) предназначен для измерения давления с погрешностью 0,05 %. Манометр (рис. 43, б) содержит сильфон 1, преобразующий измеряемое давление  $p$  в усилие, которое с помощью стержня 2 изгибает упругую балку 4. Пропорциональная давлению деформация воспринимается тензорезисторами 3, включенными в мостовую схему, причем два резистора работают на растяжение, а два других — на сжатие. Усилителем 1 (рис. 43, в) выходной сигнал усиливается и после преобразований поступает на цифровое табло указателя 2. Одновременно происходит преобразование в аналоговый и кодовый выходные сигналы.

Узлы измерительного механизма, усилителя, блока питания и показывающего устройства помещены в общий корпус. Габаритные размеры 120X150X230 мм, масса 4 кг. Манометр изготавливается на диапазоны измерений от 0–0,1 бар (0–10 кПа) до 0–25 бар (0–2,5 МПа) и предназначен для измерения избыточного давления и разрежения. Погрешность измерений, включая нелинейность и гистерезис, 0,05 % верхнего предела измерений. Влияние изменений температуры в диапазоне 10–40°C не превышает  $\pm 0,005$  % на 1°C.

Несмотря на ряд очевидных достоинств (высокая точность, хорошая долговременная стабильность, высокая собственная частота, применимость для изготовления небольших серий) фольговые тензорезисторы имеют также и недостатки: относительную дороговизну в связи с жесткими допусками на изготовление; невысокую тензочувствительность, свойственную всем металлическим тензорезисторам ( $k \approx 2$ ), что требует соответствующего усиления; ограниченный диапазон температур и возможности миниатюризации.

**Тонкопленочные тензорезисторы.** Дальнейшие возможности развития тензорезистивных манометров предоставила тонкопленочная техни-

ка, получившая в последнее время распространение в различных областях микроэлектроники, в которой в отличие от фольговой техники перед нанесением на подложку проводящего материала тензорезисторов на поверхность УЧЭ наносится изоляционный слой толщиной в несколько мкм, затем низкоомные проводники монтажной схемы и в последнюю очередь сам тензорезистор. При этом применяются методы напыления в вакууме, плазменной активации паров требуемых химических веществ и пр., которые позволяют наносить не только металлические пленки, но и поликристаллические материалы с повышенным коэффициентом тензочувствительности ( $k = 30-50$ ). Все это позволяет существенно уменьшить размеры УЧЭ при одновременном уменьшении диапазона измерений. Однако сложность технологии изготовления требует значительных затрат на оборудование. Поэтому изготовление тонкопленочных тензорезисторов рентабельно только при условии их массового производства.

В отличие от металлических тензорезисторов, сопротивление которых изменяется вследствие деформации поперечного сечения, в полупроводниковых тензорезисторах чувствительным к натяжению является удельное сопротивление, которое занимает очень широкий диапазон значений. Если удельное сопротивление проводников находится в диапазонах от  $10^{-5}$  до  $10^{-8}$  Ом·м, а диэлектриков от  $10^{10}$  до  $10^{16}$  Ом·м, то диапазон удельных сопротивлений полупроводников простирается от  $10^{-5}$  до  $10^4$ , т. е. охватывает почти 10 порядков. Помимо этого сопротивление полупроводников существенно зависит от содержания в них примесей, подбором которых можно изменять сопротивление в нужном направлении. Примеси, которые создают в полупроводнике свободные электроны, называют донорными, а сам полупроводник называют *n*-типа (от „негатив” — отрицательный). Примеси, которые захватывают валентный электрон и при этом у одного из атомов полупроводника возникает „дырка”, называют акцепторными (принимающими), а проводимость проводника *p*-типа (от „позитив” — положительный). Количество свободных носителей зарядов (электронов и дырок) определяет проводимость, а, следовательно, и удельное сопротивление полупроводника. При этом чувствительность удельного сопротивления полупроводникового тензорезистора к его деформации существенно выше, чем изменение сопротивления под влиянием изменения поперечного сечения. Поэтому коэффициент тензочувствительности (4.14) полупроводникового тензорезистора практически равен  $k = m$ . Если для металлических тензорезисторов коэффициент тензочувствительности  $k = 2$ , то коэффициент тензочувствительности кремния  $k = 125-135$  при *p*-проводимости и  $k = -(100-130)$  при *n*-проводимости. Это позволяет существенно упростить аппаратуру для усиления выходного сигнала.

Конструктивное выполнение полупроводниковых тензорезисторов аналогично тонкопленочным тензорезисторам (рис. 43, а). Те же технологические приемы применяются и при изготовлении полупроводниковых тензорезисторов. При этом используются два основных способа:

полупроводниковый кремниевый тензорезистор наносится на изолирующую сапфировую подложку (КНС структура);

полупроводниковый кремниевый тензорезистор с р-проводимостью наносится на кремниевую подложку с п-проводимостью (КНК структура).

В зависимости от конструктивного исполнения полупроводниковые тензорезистивные преобразователи применяются для измерения абсолютного и избыточного давления (разряжения) и разности давлений.

В нашей стране серийно изготавливаются полупроводниковые преобразователи типа „Сапфир-22”, основанные на КНС структуре.

Схема преобразователя „Сапфир-22ДИ”, предназначенного для измерения избыточного давления, представлена на рис. 44. Мембранный полу-

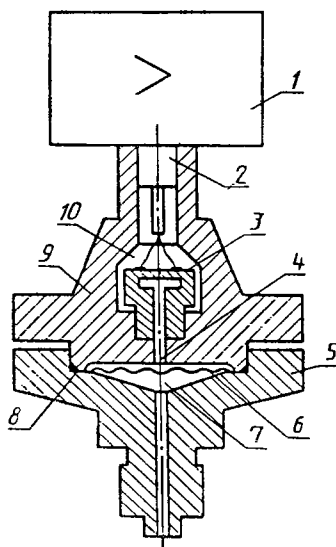
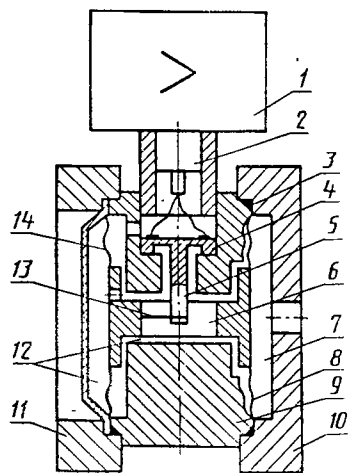


Рис. 44. Преобразователь „Сапфир-22ДИ” Рис. 45. Преобразователь „Сапфир-22ДА”

проводниковый тензопреобразователь 3 размещен внутри основания 9. Внутренняя полость 4 тензопреобразователя заполнена кремнийорганической жидкостью и отделена от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 6, приваренной по наружному контуру к основанию 9. Измеряемое давление подается в камеру фланца 5. Между основанием 9 и фланцем 5 помещена уплотняющая прокладка 8. Полость 10 сообщена с окружающей атмосферой.

Измеряемое давление воздействует на мембрану 6 и через жидкость передается на мембрану тензопреобразователя 3, вызывая ее прогиб и соответствующее изменение сопротивления тензорезисторов, соединенных в мостовую схему. Электрический сигнал по проводам через герметичный вывод 2 поступает в электронный блок 1, который содержит корректоры для плавной подстройки диапазона и нуля выходного сигнала. При измерении абсолютного давления полость 10 откачивается и герметизируется. Как при измерении избыточного давления, так и абсолютного давления в данной конструкции измеряемое давление воздействует через жидкость непосредственно на мембрану тензопреобразователя.

Для измерения абсолютных давлений не более 250 кПа применяется преобразователь „Сапфир-22ДА” (рис. 45). В отличие от предыдущего здесь применен мембранно-рычажный тензопреобразователь 4, который размещен внутри основания 9 и отделен от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 8, а от вакуумированной полости 12 металлической мембраной 14. Обе мембраны по наружному контуру приварены к основанию 9 и соединены между собой центральным штоком 6, который связан с концом рычага 5 тензопреобразователя с помощью упругой тяги 13. Внутренние полости основания также вакуумированы. Фланцы 10 и 11 уплотнены на основании 9 прокладками 3.

Измеряемое абсолютное давление подается в камеру 7. При этом последовательно происходят прогиб мембран 8 и 14, изгиб мембраны тензопреобразователя 4 и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается по проводам через герметичный вывод 2 на электронный блок 1.

Аналогичная конструкция используется для измерения разности давлений (рис. 46). В отличие от предыдущей внутренняя полость основания 4 между мембранами 3 заполнена кремнийорганической жидкостью. Воздействие измеряемой разности давлений, большее из которых подается в камеру 2, меньшее — в камеру 5, вызывает прогиб мембран 3, изгиб мембраны тензопреобразователя 1 и изменение сопротивления тензорезисторов. Измерительный блок выдерживает без разрушения воздействие односторонней перегрузки избыточным давлением. Это обеспечивается тем, что торцевые поверхности основания 4 профилированы одинаково с поверхностями мембран 3.

Преобразователи „Сапфир-22” имеют унифицированное электронное устройство, преобразующее электрический сигнал тензорезисторного моста в аналоговый стандартный сигнал 0—5 или 0—20 или 4—20 мА постоянного тока. Электрическое питание преобразователей осуществляется от источника питания постоянного тока напряжением  $(36 \pm 0,72)$  В. Преобразователи предназначены для работы при температуре от 5 до 50°C, по требованию заказчика возможно расширение диапазона температур от -20 до +80°C. Пределы допускаемой основной погрешности  $\pm 0,25$  % и  $\pm 0,5$  %, верхние пределы измерений от 0,25 кПа до 100 МПа.

Зарубежные полупроводниковые преобразователи в основном используют тензорезисторы с КНК структурой. Одна из ведущих в этой области фирма „Druck Ltd” (Англия) освоила промышленный выпуск

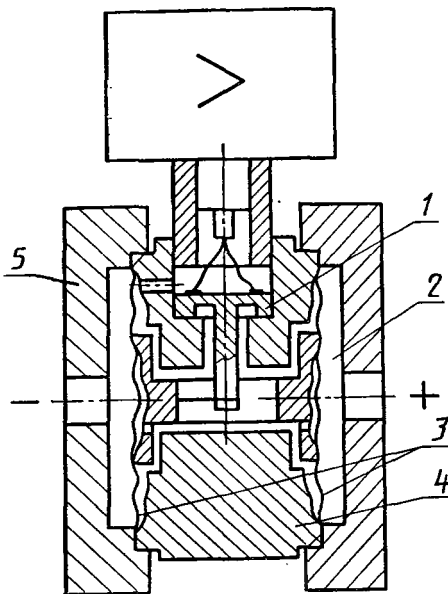


Рис. 46. Преобразователь для измерения разности давлений

полупроводниковых датчиков в комплекте с вторичными показывающими приборами типа DPJ 220 с цифровым отсчетом. Манометр отличается высокой точностью. Суммарная погрешность, вызываемая нелинейностью, гистерезисом и воспроизводимостью показаний, не превышает 0,1 % верхнего предела измерений. Долговременная стабильность составляет  $\pm 0,02\%$  за три месяца, температурный коэффициент  $\pm 0,01\%$  на  $1^\circ\text{C}$ . Диапазоны измерений: от 0–7,5 кПа до 0–50 МПа при измерении избыточного давления; от 0–17,5 кПа до 0–3,5 МПа при измерении разности давлений; от 0–35 кПа до 0–50 МПа при измерении абсолютного давления.

#### Контрольный вопрос № 7

Что определяет тензочувствительность резистивных полупроводниковых тензодатчиков к давлению — изменение геометрических размеров тензорезистора или изменение удельного электрического сопротивления материала тензорезистора?

Если Вы считаете изменение геометрических размеров, то см. с. 108, если — изменение удельного электросопротивления, то см. с. 110.

При этом достигнут хороший уровень миниатюризации. Масса вторичного прибора составляет 0,6 кг, габаритные размеры 100×45×200 мм. Питание осуществляется от сети переменного тока 220 В, аналоговый токовый выходной сигнал 4–20 мА.

Преимуществами тензорезистивных полупроводниковых преобразователей является: высокий коэффициент тензочувствительности; возможность миниатюризации чувствительного элемента; непосредственное применение достижений современной микроэлектроники.

К недостаткам полупроводниковых преобразователей относятся: сложность технологии изготовления ЧЭ, что неприемлемо при мелкосерийном производстве; хрупкость ЧЭ, что ограничивает их применение в условиях сотрясений, скачков давления; относительно большое влияние



температуры на коэффициент тензочувствительности. Последнее особенно важно для тензорезисторов, основанных на КНК структурах, максимальная температура эксплуатации которых ограничена  $120^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.5. Манометры с силовой компенсацией

Все рассмотренные выше деформационные манометры основаны на методе прямого преобразования давления (см. рис. 32, *а*). Метод уравновешивающего преобразования давления (см. рис. 32, *б*), хотя и менее распространен в технике измерения давления, но продолжает сохранять заметную роль в некоторых отраслях промышленности, в которой находят применение манометры с силовым уравновешиванием двух типов: уравновешивание измеряемого давления пневматическим давлением (пневматическая силовая компенсация); уравновешивание измеряемого давления электромагнитными силами (электромагнитная силовая компенсация).

При этом во время уравновешивания силы, возникающей в первичном ЧЭ под действием измеряемого давления, силой, развиваемой цепью обратной связи, происходит незначительное перемещение первичного ЧЭ, независимо от его жесткости, что позволяет в широких пределах варьировать чувствительность измеряемой системы.

##### К контрольному вопросу № 7

Вы плохо усвоили принцип действия полупроводниковых преобразователей давления. Еще раз внимательно просмотрите разд. 4.4.

**Манометры с пневматической силовой компенсацией.** Принципиальная схема манометра (преобразователя давления) с пневматической силовой компенсацией представлена на рис. 47. Измерительная система преобразователя состоит из сильфона 1, жестко связанного с рычагом 2, второй конец которого выполнен в форме плоской заслонки. Система обратной связи содержит сопло 3, которое перекрывается заслонкой при повороте рычага 2, дросселя 4 и сильфона 7, жестко связанного с рычагом, вдоль которого может передвигаться установочный ролик 8.

При воздействии измеряемого давления  $p_{\text{и}}$  жидкости или газа на сильфон 1 возникает сила, стремящаяся повернуть рычаг 2 и тем самым прижать заслонку к соплу 3, которое с помощью дросселя 4 сообщено с источником давления питания. Благодаря этому давление в системе обратной связи повышается и после усилителя поступает в сильфон 7, связанный с рычагом и пружиной 5, развивая посредством установочного ролика 8 уравновешивающее усилие на рычаг 2. Давление, которое необходимо для достижения равновесия измерительной системы, пропорционально измеряемому давлению, причем коэффициент пропорциональности определяется эффективными площадями сильфонов 1 и 7 и соотношением плеч рычагов. Этим достигается соответствие диапазона измеряемого давления  $p_{\text{и}}$  диапазону выходного давления воздуха  $p_{\text{вых}}$ , который

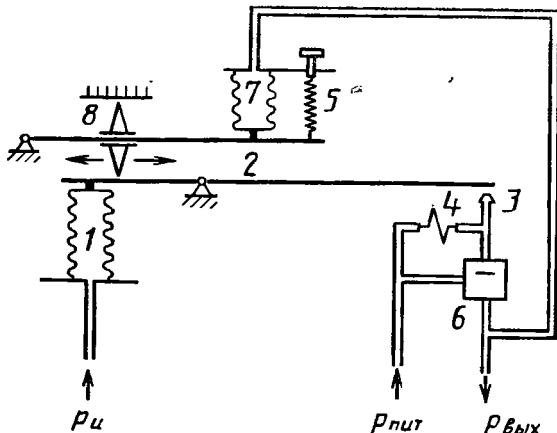


Рис. 47. Схема преобразователя давления с пневматической силовой компенсацией

составляет, 20–100 кПа (стандартный выходной пневматический сигнал).

В нашей стране выпускается преобразователь разности давлений типа 13ДД11 (рис. 48). Измерительная система преобразователя содержит основание 1, к которому фланцами герметично прикреплены разделительные мембраны 9. Центры мембран жестко соединены стержнем 10, в прорезь которого помещен нижний конец рычага 2 с пружиной 4, закрепленного на упругой опоре 3. Внутренняя полость основания 1 между мембранами 9 заполнена кремнийорганической жидкостью.

При подаче на разделительные мембраны измеряемой разности давлений на нижний конец рычага со стороны стержня действует сила, стремящаяся повернуть рычаг, верхний конец которого с помощью заслонки 5 увеличивает сопротивление при истечении сжатого воздуха из сопла 6, питаемого давлением  $p_{\text{пит}} = 140$  кПа через постоянный дроссель. Благодаря этому давлению воздуха в цепи обратной связи, усиленное пневмореле 7, увеличивается до тех пор, пока усилие со стороны сильфона 8 не уравнивает усилие со стороны измеряемого давления. При достижении равновесия измерительной системы измеряемая разность давлений определяется выходным давлением  $p_{\text{вых}}$ .

Преобразователи предназначены для эксплуатации при температуре окружающего воздуха от  $-50$  до  $+80^\circ\text{C}$ . Пределы допускаемой основной погрешности 0,6 и 1,0 %, верхние пределы измерений разности давлений в зависимости от модификации колеблются от 1 до 630 кПа при рабочем избыточном давлении от 2,5 до 40 МПа. Масса прибора от 5,2 до 14 кг, габаритные размеры от 197X155X100 до 300X188X140 мм. Достоинство преобразователя — его практически полная взрывобезопасность.

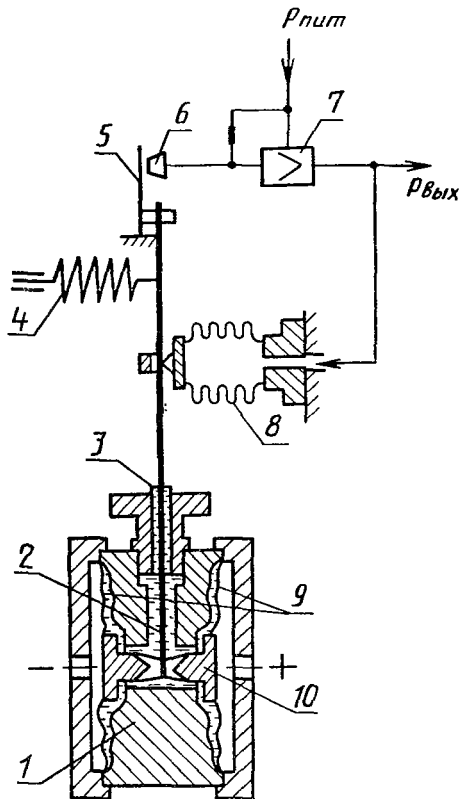


Рис. 48. Преобразователь разности давлений типа 13ДЦ-11

Аналогичные по своим характеристикам преобразователи с пневматической силовой компенсацией для измерения абсолютного и избыточного давления и разности давлений выпускаются и зарубежными фирмами „Siemens“, „Gulde – Regelfarmafurer“ (ФРГ) и др.

К контрольному вопросу № 7

Материал разд. 4.4 Вами усвоен. Продолжайте дальнейшее изучение учебника.

**Манометрические приборы с силовым электромагнитным уравниванием** отличаются от всех других типов, рассмотренных ранее, тем, что в них путем использования обратной связи происходит сравнение электрической выходной величины с входной механической. Следовательно, достигается состояние равновесия между входной силой, возникающей в результате воздействия давления на УЧЭ, и противоположно направленной силой, создаваемой электрическим током, значение которого является мерой

давления. Обладая очевидными достоинствами (долговременная стабильность, практическая независимость статических и динамических характеристик от других характеристик УЧЭ), преобразователи с силовым уравниванием имеют обычно относительно большие размеры и массу. Этим, в основном, объясняется их замена датчиками других типов во многих отраслях промышленности. Однако в тех областях науки и техники, где требуется высокая точность измерений, эффективность применения манометрических приборов с электромагнитной силовой компенсацией не вызывает сомнений.

В нашей стране серийно выпускаются измерительные преобразователи давления типа ИПД, предназначенные для прецизионных измерений в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами. Преобразователь (рис. 49) состоит из чувствительного элемента (сильфона) 5, рычага 3 с опорой 4, двух механиз-

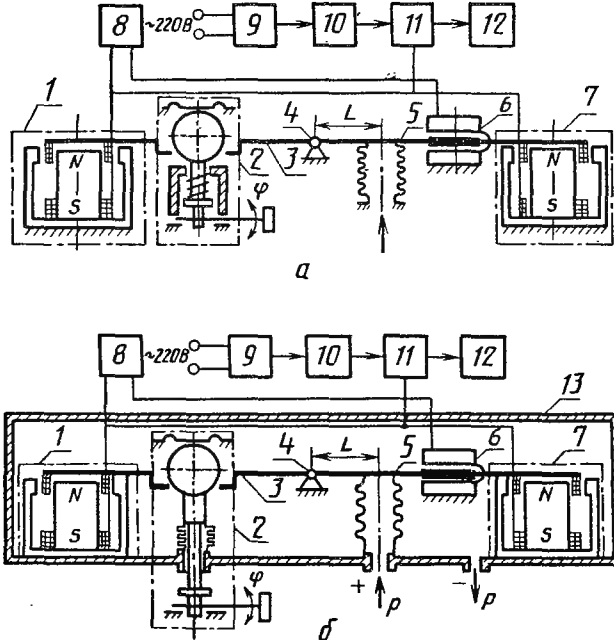


Рис. 49. Преобразователь давления типа ИЦД

мов обратной связи 1 и 7, индикатора рассогласования 6 дифференциально-трансформаторного типа, нагрузочного устройства 2 и блока усилителя 8.

Преобразователь работает следующим образом. В чувствительный элемент 5 подается измеряемое давление, который преобразует это давление в усилие, передаваемое на рычаг 3, что приводит к перемещению рычага и связанного с ним плунжера индикатора рассогласования 6. Индикатор преобразует перемещение в управляющий сигнал переменного тока, поступающий на вход блока усилителя 8, который преобразуется в выходной сигнал постоянного тока. Последний поступает одновременно в обмотки катушек силовых механизмов обратной связи 1 и 7 и на блок резисторов 11, преобразующих выходной сигнал усилителя в выходной сигнал преобразователя в виде напряжения постоянного тока. В силовом механизме взаимодействие поля постоянного магнита с магнитным полем, которое создается током усилителя 8, протекающим по обмотке подвижной катушки, создает пропорциональное этому току усилие. Обмотки катушек силовых механизмов 1 и 7 включены в противоположном направлении, поэтому моменты развиваемых ими сил складываются и уравнивают момент силы, создаваемый чувствительным элементом на плече  $L$ .

Преобразователь позволяет производить его самопроверку в процессе эксплуатации. При этом нижний предел измерений корректируется при нулевом значении давления путем сообщения чувствительного элемента с атмосферой, а верхний предел измерений — наложением на рычаг 3 калибровочного шарика нагрузочного устройства 2.

Питание преобразователя производится от сети переменного тока напряжением 220 В понижающим трансформатором 9 и источником стабилизированного питания 10.

Модификации преобразователей позволяют измерять как избыточное давление (рис. 52, а), так и разность давлений (рис. 52, б). В последнем случае измерительный механизм преобразователя помещается в герметичный корпус 13, в присоединительный штуцер которого подается меньшее из измерительных давлений.

Преобразователь в комплекте с блоком индикации 12 применяется в качестве образцового показывающего манометра с цифровым отсчетом.

Расчетное цифровое показание\* блока индикации, соответствующее измеряемому давлению, определяется по формуле

$$* U_D = U_{\max} \cdot \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}}, \quad (4.17)$$

где  $U_{\max}$  — цифровое показание блока индикации, соответствующее верхнему пределу измерений измеряемого давления;  $p$  — значение измеряемого давления;  $p_{\max}$  — верхний предел измерений;  $p_{\min}$  — нижний предел измерений (для всех модификаций, кроме модификации с диапазоном измерений 20–100 кПа  $p_{\min} = 0$ ). Основные метрологические характеристики манометров ИПЦЦ:

верхние пределы измерений от –10 до –100 кПа для вакуумметров; от 6 кПа до 16 МПа для манометров;

предел допускаемой основной погрешности от  $\pm 0,06$  до  $\pm 0,25$  % (в зависимости от диапазона измерений);

зона нечувствительности не превышает 0,01 %;

изменение показаний от влияния температуры не более 0,01 % на  $1^\circ\text{C}$ ;

габаритные размеры преобразователя 100X468X220 мм, цифрового вольтметра Ц304 61X219X310, масса 16 кг.

Ограниченный объем книги не позволяет рассмотреть многие другие типы деформационных манометров, сведения о которых имеются в технической литературе по технике измерения давления.

#### Контрольный вопрос № 8

Имеет ли место нелинейность статической характеристики в деформационных манометрах с силовой компенсацией? Да или нет?

Если „да” — см. с. 114, если „нет” — см. с. 115.

\* Отсчет показаний производится по табло цифрового вольтметра.

По принципу действия деформационные манометры требуют для своей градуировки применения методов и средств, основанных на абсолютных методах воспроизведения давления. Повышение их точности, в принципе, ограничено точностью применяемых при градуировке жидкостных и поршневых эталонов, которая характеризуется погрешностями порядка  $1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$ . Это позволило уже в настоящее время создать образцовые деформационные манометры, погрешности которых не превышают  $2,5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$  (0,025–0,05 %). Дальнейшее повышение точности деформационных манометров в связи с их недостаточно высокой долговременной стабильностью возможно лишь при условии периодической корректировки показаний в процессе эксплуатации, что может быть достигнуто как путем периодического сравнения показаний деформационного манометра с показаниями точного и стабильного поршневого манометра, так и другими способами. Например, фирмой „Druck Ltd” (Англия), для этих целей разработан цифровой манометр типа DPJ501, в котором аналоговые выходные сигналы полупроводникового датчика давления автоматически корректируются вибрационно-частотным датчиком давления типа NT3080 фирмы „Solartron” (Англия). При этом погрешность измерения не превышает 0,015 %.

Одно из важнейших направлений развития точных деформационных манометров — разработка портативных образцовых переносных манометров, пригодных для контроля рабочих средств измерений на месте их эксплуатации. Так, на основе полупроводниковых датчиков давления и современной электроники фирмой „Druck Ltd” разработан переносной образцовый манометр типа DPJ600 класса точности 0,1, модификации которого предназначены для измерения избыточного давления в диапазонах от 0–7,5 кВ до 0–7 МПа; абсолютного давления от 0–35 кПа до 0–3,5 МПа и разности давлений от 0–7,5 до 0–1000 кПа. Погрешность, вызываемая совместным влиянием нелинейности, гистерезиса и воспроизводимости, не превышает  $\pm 0,1$  % для диапазонов до 3,5 МПа и  $\pm 0,2$  % для диапазонов до 7 МПа. Дискретность цифрового отсчета  $5 \cdot 10^{-5}$  (0,005 %). Температурный коэффициент чувствительности не превышает 0,02 %/°С. Габаритные размеры 305X180X110 мм, масса 4 кг.

Переносной манометр содержит переключатели единиц измерений и диапазонов измерений, ручной насос, регулятор объема, корректор нуля и штуцер для подключения измеряемого давления. Питание прибора осуществляется от батареек напряжением 12 В или от внешнего источника питания.

Однако, основное назначение деформационных манометров состоит в удовлетворении потребностей различных отраслей промышленности в измерении давления, так как в каждой отрасли существуют свои требования к условиям эксплуатации, формам представления информации, точности и надежности, необходимым габаритным размерам и массе, стоимости приборов и пр.

Все это требует совершенствования различных параметров и свойств деформационных манометров, специфика которых определяется их назначением и принципом действия.

#### К контрольному вопросу № 8

Вы правильно ответили на вопрос. Несмотря на сведения к минимуму нелинейности УЧЭ, необходимо принимать во внимание нелинейность цепи обратной связи и в первую очередь — нелинейность силового электромагнита.

Выпускаемые десятками миллионов штук общепромышленные стрелочные деформационные манометры с механическим преобразованием давления, требования к точности которых относительно невысоки ( $\delta_p > 1\%$ ), в конструктивном отношении радикальной модернизации не требуют. Основная задача состоит в повышении качества изготовления с целью достижения долговечности и надежности и, в первую очередь, улучшении таких метрологических характеристик деформационных манометров, как нелинейность и вариация показаний. Необходимо также дальнейшее совершенствование материалов УЧЭ с целью понижения их чувствительности к изменениям температуры.

Деформационные манометры, основанные на электрических методах преобразования (индуктивные, емкостные и др.), обеспечивая достаточно высокую точность, нуждаются в совершенствовании методов защиты их электрических цепей от воздействия внешних электрических и магнитных полей, особенно при необходимости размещения на расстоянии УЧЭ и электроники.

Дальнейшее развитие получают металлические и полупроводниковые тензорезистивные деформационные манометры.

Фирмой „Statham Instr” (США) разработаны тонкопленочные металлические резистивные датчики Р1000, способные без регулировки стабильно работать в условиях бурения в море в течение более 5 лет. Технология изготовления тензорезистора основана на напылении в вакууме металлической пленки на керамическую подложку, предварительно нанесенную на мембрану из нержавеющей стали. Датчик защищен от воздействия внешней среды двойным корпусом, приваренным к основанию.

Технология изготовления кремниевых полупроводниковых тензодатчиков в настоящее время отработана достаточно хорошо и ее совершенствование будет продолжаться по мере развития микроэлектроники. Однако при температуре выше  $200^\circ\text{C}$  полупроводниковый кремний теряет свою тензочувствительность, превращаясь в обычный проводник, что не допускает их применение в условиях высоких температур (внутри работающих автомобильных и реактивных двигателей, в буровых установках глубокого бурения и пр.). Весьма перспективна для этих целей замена кремния на карбид кремния (карборунд). В настоящее время уже созданы транзисторы из карбида кремния на подложке из его окислов, нанесенной на металлическую мембрану. Полупроводниковые свойства такого тензорезистора при температуре  $650^\circ\text{C}$  аналогичны свойствам обычного кремниевого тензорезистора при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

В настоящее время проводятся также разработки полупроводниковых тензорезисторов, предназначенных для работы в условиях низких температур (сверхпроводящие магнитные системы термоядерных установок, криогенные накопители энергии, реактивные двигатели на сжиженном водороде и пр.) в диапазоне от 2 до 100 К (от  $-271$  до  $-173^{\circ}\text{C}$ ). В этих условиях чистые полупроводники превращаются в диэлектрики. Введение в кремний примесей позволяет сохранить тензочувствительность, хотя она существенно снижается. В нашей стране разработан датчик такого типа. Основанный на структуре КНС датчик „Криос ДА” наиболее перспективен в диапазоне давлений от 0,1 до 10 МПа. Основная погрешность 1 %, дополнительная погрешность не превышает 2 % в диапазоне 4–77 К и 4 % — в диапазоне температур 77–300 К.

#### К контрольному вопросу № 8

Вы ошиблись. Силовая компенсация позволяет существенно уменьшить нелинейность УЧЭ. Однако при этом не устраняется нелинейность цепи обратной связи, величина которой доходит до 50 % предела основной допускаемой погрешности.

Вам следует еще раз просмотреть разд. 4.3.

В связи с широким внедрением ЭВМ в системы контроля, регулирования и управления производственными и технологическими процессами наметилась тенденция разработки совместных с ними миниатюрных микропроцессорных аналого-цифровых преобразователей, встроенных в полупроводниковые датчики (например, датчик ST-3000 с погрешностью 0,1 %, разработанный американской фирмой „Honeywell”. Однако указанное не исключает дальнейшее развитие современных относительно дешевых полупроводниковых датчиков.

## Глава 5. МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

В отличие от методов прямых измерений давления, на которых основаны рассмотренные ранее жидкостные, поршневые и деформационные манометры, методы косвенных базируются на измерении физических величин (температуре, объеме), значения которых связаны с давлением известными физическими закономерностями, или на изменении физических свойств измеряемой среды под действием давления (теплопроводности, вязкости, электропроводности и пр.). Косвенные методы, как правило, находят применение в тех случаях, когда прямые методы измерения давления трудно осуществимы, например, при измерении весьма малых давлений (вакуумные измерения) или при измерениях сверхвысоких давлений. Указанные области техники измерения давления в силу своей специфики выходят за рамки данной книги, поэтому целесообразно ограничиться кратким рассмотрением косвенных методов, нашедших применение при измерении давления.



### 5.1. Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Связь между важнейшими термодинамическими параметрами газа определяется соотношением

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \quad (5.1)$$

где  $p$  — абсолютное давление газа;  $T$  — абсолютная температура газа;  $V$  — объем, занимаемый газом.

Соотношение (5.1) называется объединенным газовым законом и формулируется следующим образом: при постоянной массе газа произведение объема на давление, деленное на абсолютную температуру газа, есть величина, одинаковая для всех состояний этой массы газа.

Уравнение состояния для произвольной массы идеального газа (уравнение Клайперона-Менделеева) имеет вид

$$pV = \frac{m}{\mu} \cdot RT, \quad (5.2)$$

где  $m$  — масса газа;  $\mu$  — масса одного киломоля газа;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Для упрощения процесса измерения давления один из параметров состояния ( $T$  или  $V$ ) сохраняется постоянным. Тогда давление однозначно определяется по результатам измерения  $V$  или  $T$ . Например, при измерении изменений атмосферного давления в баронивелировании нашли применение газовые барометры, принцип действия которых основан на использовании уравнения состояния газа (5.1) при постоянной температуре. В этом случае уравнение (5.1) принимает вид (закон Бойля-Мариотта).

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const}, \quad (5.3)$$

т. е. при постоянной массе газа и неизменной температуре давление обратно пропорционально занимаемому газом объему.

Принципиальная схема газового барометра конструкции Штриплинга изображена на рис. 50, а. Прибор состоит из двух камер, одна из которых 2 может быть сообщена с атмосферным давлением, а другая 3 замкнута. Обе камеры связаны между собой капилляром, в середине которого находится капля масла 1, выполняющая роль указателя нуля. При равенстве давлений в камерах капля устанавливается на нулевой отметке. Равенство давлений достигается изменением объема камеры 3 посредством перемещения сильфона 4 с помощью винта и червячной передачи с отсчетом числа оборотов червяка по цифровому счетчику. При погрешности термостатирования  $0,001^\circ\text{C}$  изменения давления фиксируются с погрешностью менее 0,5 Па.

В соответствии с формулой (5.3) изменение давления по сравнению с давлением  $B_0$  может быть определено из соотношения

$$\Delta B = B_0 \frac{\Delta V/V_0}{1 - \Delta V/V_0}, \quad (5.4)$$

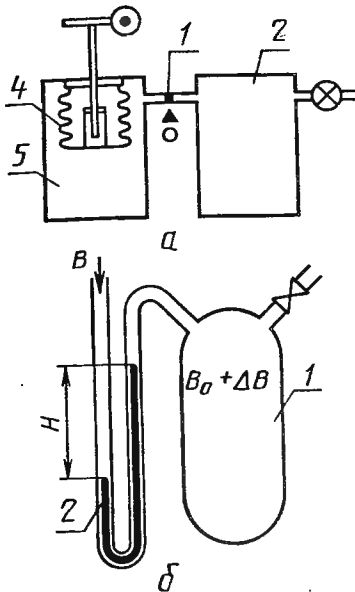


Рис. 50. Принципиальная схема газового барометра

где  $B_0$  — атмосферное давление в момент его подачи в камеру 2 (установка нуля) при предварительном уравнивании;  $V_0$  — объем камеры 3 при давлении  $B_0$ ;  $\Delta V$  — изменение объема камеры 3, необходимое для достижения равновесия при изменении атмосферного давления  $\Delta B$ .

При  $\Delta V \ll V_0$  изменение объема камеры практически пропорционально изменению атмосферного давления.

В дифференциальном газовом барометре системы Д.И. Менделеева (рис. 50, б) изменение атмосферного давления определяется комбинированным методом. Барометр состоит из замкнутого сосуда 1, соединенного с давлением окружающего воздуха при помощи V-образного жидкостного манометра 2. Изменение атмосферного давления при  $\Delta V \ll V_0$  определяется по формуле

$$\Delta B = H \cdot \rho \cdot g + \frac{H \cdot f}{2V_0} \cdot B_0, \quad (5.5)$$

где  $H$  — высота столба жидкости;  $\rho$  — плотность жидкости, заполняющей манометр;  $g$  — ускорение свободного падения;  $f$  — площадь сечения манометрической трубки;  $V_0$  — объем замкнутого сосуда 1;  $B_0$  — атмосферное давление при предварительном уравнивании ( $H = 0$ ).

Как видно из формулы (5.5), барометр основан на уравнивании изменений атмосферного давления как столбом жидкости, так и сжатием (расширением) газа в замкнутом сосуде по закону Бойля-Мариотта (5.3). Как и ранее, необходимо тщательное термостатирование сосуда 1 или введение температурной поправки, равной 0,37 % на  $1^\circ\text{C}$ .

Следует отметить, что рассмотренные выше газовые барометры в связи с появлением высокоточных деформационных барометров аналогичного назначения в настоящее время практически не применяются. В отличие от этого в области вакуумных измерений указанный принцип находит широкое применение. Компрессионные („компрессия” — сжатие) и экспансионные („экспансия” — расширение) манометры являются основными средствами воспроизведения и передачи единицы давления в области вакуумных измерений в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^3$  Па ( $10^{-5}$  — 10 мм рт. ст.).

Принципиальная схема компрессионного манометра, представленная на рис. 51, была предложена Мак-Леодом еще в 1874 г. Манометр состоит из стеклянного сосуда 4, в верхнюю часть которого впаян измерительный капилляр 3. По трубке 1 сосуд 4 сообщается с вакуумной системой,

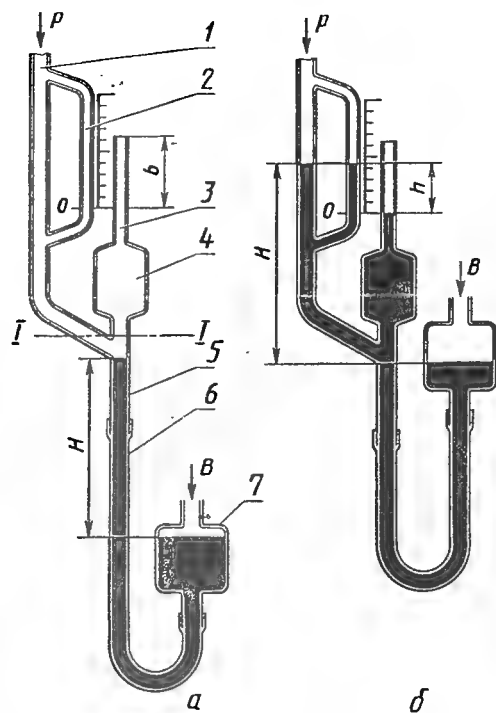


Рис. 51. Принципиальная схема компрессионного манометра

в которой измеряется давление газа. Заполненный ртутью резервуар 7 присоединен к прибору гибким шлангом 6 и трубкой 5. Параллельно измерительному капилляру 3 к трубке 1 припаян сравнительный капилляр 2.

Перед измерением давления  $p$  в вакуумной системе резервуар 7 опускается до тех пор, пока мениск ртути в трубке 5 не расположится ниже уровня I—I (рис. 51, а). При этом давление газа в сосуде 4 будет равно давлению в вакуумной системе. Ввиду малости измеряемого давления высота столба ртути  $H$  практически соответствует атмосферному давлению  $B$ , действующему на поверхность ртути в резервуаре 7, причем высота столба ртути не изменяется, т. е. при любом положении резервуара остается постоянной.

При измерении давления ртуть посредством подъема резервуара достигает уровня I—I и отсоединяет сосуд 4 от вакуумной системы. Дальнейший подъем ртути производят до совмещения мениска ртути в капилляре 3 с нулевой отметкой (рис. 51, б). При этом в соответствии с законом Бойля-Мариотта (5.3) давление в незаполненной части капилляра 3 станет равным

$$p_k = \frac{V}{V_k} \cdot p, \quad (5.6)$$

где  $V$  — объем сосуда 4 вместе с капилляром;  $V_k = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l$  — объем части капилляра, расположенной выше нулевой отметки;  $l$  и  $d$  — длина и диаметр внутреннего сечения капилляра.

Принимая во внимание, что давление  $p$  в вакуумной системе при этом не изменяется, получим

$$p = \frac{V_k/V}{1 - V_k/V} \cdot h \cdot \rho \cdot g, \quad (5.7)$$

где  $h$  — разность уровней ртути в капиллярах 2 и 3.

Отсюда следует, что чувствительность манометра тем больше, чем меньше отношение  $V_k/V$  или больше отношение  $V/V_k$ . Однако существуют определенные ограничения. Так, внутренний диаметр капилляра  $d_{\min} = 0,5$  мм, исходя из условий получения отверстия правильной цилиндрической формы по всей длине канала, а с другой стороны, объем сосуда  $V_{\max} = 500-1000$  см<sup>3</sup>, так как при этом масса заключенной в нем ртути составит  $m = 7-14$  кг, что лимитирует, исходя из соображений, прочность сосуда. Поэтому, как правило,  $V/V_k < (2,5-5) \cdot 10^4$ .

Экспансионные манометры (установки с калиброванными объемами) в отличие от компрессионных основаны на понижении известного давления от требуемого значения. Для этого в сосуде с относительно небольшим объемом  $V_1$  создается давление, достаточное для точных измерений.

Затем с помощью вентили этот сосуд соединяется с предварительно откачанным сосудом, объем которого  $V_2$  существенно больше объема  $V_1$ . При этом согласно (5.5) давление понизится в отношении начального и конечного объемов

$$p_2 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot p_1 \cong \frac{V_1}{V_2} \cdot p_1. \quad (5.8)$$

Установки с компрессионным и экспансионным манометрами, дополняя друг друга, обладают наивысшей в области вакуумных измерений точностью. Они включены в состав государственного специального эталона в области низких абсолютных давлений (от  $10^{-8}$  до  $10^3$  Па), а также в национальные эталоны других стран.

Для определения давления применимо также уравнение состояния газа при постоянном объеме (изохорический процесс). В этом случае уравнение состояния (5.2) принимает вид (закон Шарля, 1787 г.)

$$p = k \cdot T, \quad (5.9)$$

где  $k = \frac{m \cdot R}{\mu V}$  — постоянная.

Из уравнения (5.9) следует, что при постоянной массе газа и неизменном объеме давление газа прямо пропорционально его абсолютной температуре. Однако, несмотря на предельную простоту метода, его реализация связана с необходимостью применения довольно сложных автоматических систем для приведения температуры в соответствие с измеряемым давлением, что осложняется инерционностью процесса нагрева (охлаждения) газа. Поэтому этот метод практического применения не нашел.

#### Контрольный вопрос № 9

Относится ли по принципу действия компрессионный ртутный манометр к жидкостным манометрам? Да или нет?

Если „да”, то см. с. 121, если „нет” — см. с. 123.

## 5.2. Косвенные методы, основанные на фазовых переходах

Известно, что любое вещество в зависимости от давления и температуры может находиться в различных агрегатных состояниях (твердой, жидкой и газообразной фазах). Типовая диаграмма состояний в координатах  $p$  и  $T$  представлена на рис. 52. Кривыми линиями изображены границы между различными фазами (кривые равновесия фаз), соответствующие давлениям и температурам, при которых из одной фазы в другую переходит одинаковое число молекул. При этом кривая  $СК$  выражает

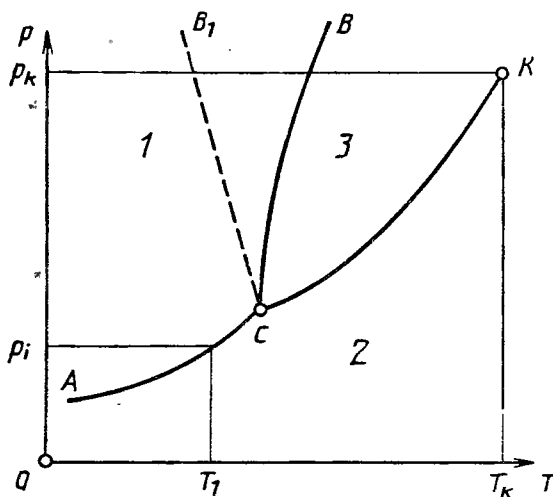


Рис. 52. Типовая диаграмма состояний

зависимость от температуры давления насыщенного пара над жидкостью; кривая  $AC$  — давления насыщенного пара над твердым телом, кривая  $BC$  — температуры плавления от давления. Например, при давлении  $p_1$  и температуре  $T_1$  будет наблюдаться равновесие твердой 1 и газообразной 2 фаз. Если при той же температуре  $T_1$  давление понизить, то начнется переход твердой фазы в газообразную. Этот процесс называется возгонкой или сублимацией („сублимаре” — возносить). Аналогично на границе  $BC$  происходит плавление твердой фазы (кристаллизация жидкой фазы 3), а на границе  $CK$  — кипение жидкой фазы (конденсация газообразной фазы). Необходимо отметить также две особые точки. Тройная точка  $C$ , находящаяся на пересечении всех трех кривых равновесия фаз, характеризует состояние вещества, когда находятся в равновесии одновременно твердая, жидкая и газообразная фазы. Критическая точка  $K$  соответствует критической температуре  $T_K$  и критическому давлению  $p_K$ , при которых теряется всякое различие между жидкостью и ее паром, а граница между ними исчезает.

Указанные выше кривые равновесия фаз и тройная точка используются в косвенных методах определения давления по результатам измерения температуры в равновесных точках (в области температурных измерений, наоборот, температура определяется по результатам измерения давления).

Диаграмма состояний дает наглядное представление о выборе того или иного фазового перехода в зависимости от определяемого давления. Кривая плавления *BC* немного отклоняется от вертикали к оси абсцисс, т. е. температура плавления имеет небольшую чувствительность к давлению. Так, температура плавления льда изменяется на 1 К при изменении давления на 13 МПа (следует отметить, что в отличие от большинства веществ температура плавления льда понижается при повышении давления — штриховая линия *CB* на рис. 52). Поэтому кривые плавления используются в косвенных методах определения высоких и сверхвысоких давлений. Процесс сублимации (кривая *AC*) происходит, как правило, при низких температурах и давлениях, что позволяет его использовать при определении давления в области вакуумных измерений. И, наконец, фазовый переход жидкость—пар (кривая *CK*) наиболее удобен для области средних давлений. Помимо указанного, при выборе того или иного фазового перехода необходимо учитывать физические свойства применяемого вещества.

В области измерения высоких и сверхвысоких давлений его значение воспроизводится по кривой плавления ртути, полуэмпирическое уравнение которой получают по результатам исследований сравнением с эталонным поршневым манометром. Это позволяет построить непрерывную шкалу давлений, по которой градуируются средства измерений высоких и сверхвысоких давлений низшей точности.

#### К контрольному вопросу № 9

Вы ответили неверно. В жидкостном манометре измеряемое давление определяется высотой столба жидкости. В компрессионном манометре измеряемое давление предварительно многократно увеличивается в отношении объема сосуда к объему капилляра (закон Бойля-Мариотта), что в основном и определяет принцип действия прибора.

Прочтите более внимательно разд. 2.3.

В нашей стране (НПО „ВНИИФТРИ“) разработана шкала давлений, основанная на кривой плавления ртути (КПР-83), которая охватывает диапазон давлений от 100 до 4000 МПа. Погрешность воспроизведения давления 0,05 % в диапазоне от 100 до 1500 МПа; 0,5 % — до 2500 МПа и 1 % — до 4000 МПа.

Полученная точность полностью удовлетворяет в настоящее время потребности науки и техники. Значение шкалы передано группе образцовых манганиновых манометров сопротивления, погрешность которых составляет  $\pm 0,5$  % при давлении до 2,5 ГПа и  $\pm 2$  % при давлениях до 4 ГПа. В перспективе этот метод позволит создать эталон — свидетель государственного эталона высоких давлений нашей страны.

В области средних давлений, где успешно применяются высокочисленные средства измерений, основанные на прямых методах, использование косвенных методов нецелесообразно. Однако представляет интерес получивший распространение в первой половине нашего века простой способ измерения атмосферного давления, основанный на фазовых переходах „жидкость—пар” (кривая СК на рис. 52), который легко может быть продемонстрирован в любой, даже школьной, лаборатории.

Прибор — гипсотермометр (рис. 53) состоит из термометра 1, сосуда с дистиллированной водой 2 и нагревателя 3. При кипячении воды в сосуде давление насыщенных паров над ее поверхностью благодаря отверстиям на наружной стенке горловины выравнивается с давлением окружающего воздуха. Взаимосвязь между давлением и температурой на кривой парообразования наиболее полно отображается универсальным уравнением проф. М.К. Жоховского, которое охватывает весь процесс фазовых переходов жидкость—пар от тройной точки до критической точки (см. рис. 52). Указанное уравнение применимо также для описания процессов плавления и сублимации. В узком диапазоне давлений (975—1025 гПа), в пределах которого находится атмосферное давление на равнинных местностях, для упрощенных расчетов применяют простую формулу, принимая прямую пропорциональность температуры кипения атмосферному давлению. Упрощенная формула имеет вид

$$p = p_0 + k(t - t_0), \quad (5.10)$$

где  $t$  — температура кипения воды;  $t_0 = 100^\circ\text{C}$ ;  $p_0 = 1013 \text{ гПа}$  (760 мм рт.ст.);  $k = 35,5 \text{ гПа}/^\circ\text{C}$  (26,7 мм рт.ст./ $^\circ\text{C}$ ).

Из формулы (5.10) следует, что погрешность измерения температуры  $\Delta t = 0,01^\circ\text{C}$  приводит к погрешности измерения давления  $\Delta p = 0,4 \text{ гПа}$  (0,3 мм рт.ст.). Это примерно соответствует точности ртутных барометров. Однако, учитывая приближенность уравнения (5.10), гипсотермометр необходимо проградуировать по образцовому барометру соответствующей точности ( $\Delta p \leq 0,1 \text{ мм рт.ст.}$ ). Следует также отметить, что в данном случае равновесие фаз в строгом понимании отсутствует, так как пары воды непрерывно рассеиваются в окружающее пространство.

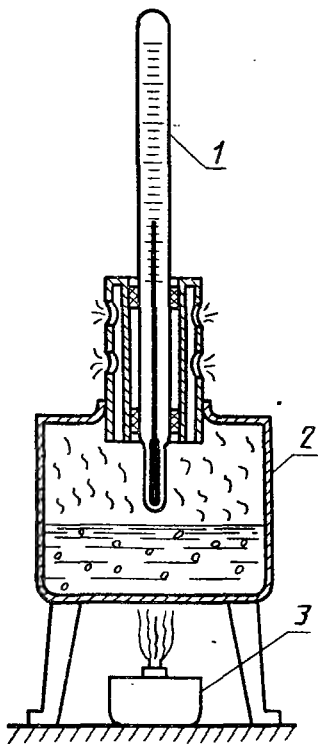


Рис. 53. Гипсотермометр

Для определения давления находят также применение методы, основанные на зависимости от давления различных физических свойств жидкостей и газов и протекающих в них процессах. При этом были использованы результаты исследований влияния давления на плотность и вязкость, диэлектрическую проницаемость, скорость распространения ультразвука, теплопроводность и другие свойства измеряемой среды.

В области высоких и средних давлений указанные методы широкого распространения не получили в связи с их относительной сложностью и трудоемкостью по сравнению с другими методами (применение манганинового манометра сопротивления в области высоких давлений, прямые методы измерений в области средних давлений).

В области вакуумных измерений указанные методы применяются практически повсеместно. Зависимость теплопроводности разреженного газа от давления используется в тепловых и термопарных манометрах; зависимость тока положительных ионов от измеряемого давления — в ионизационных манометрах. Используется также зависимость от давления вязкости газа, кинетической энергии молекул, концентрации молекул и пр.

#### К контрольному вопросу № 9

Вы правильно ответили на вопрос. Метод косвенного измерения давления путем предварительного сжатия газа не зависит от манометра, которым измеряется давление сжатого газа.

Наибольшее распространение в вакуумной технике (около 70 %) получили термопарные и ионизационные манометры.

Термопарный манометр (рис. 54, а) так же, как и тепловой, основан на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления. Манометр содержит стеклянную или металлическую колбу 3, в которой помещены нагреватель 1 и впаянная в него термопара 2. Нагреватель питается от источника переменного тока, и его температура, а следовательно, и температура термопары, определяется теплоотдачей в окружающий разреженный газ. Чем меньше давление газа, тем меньше его теплопроводность и тем больше температура, а следовательно, ЭДС на выходе термопары, которая и является мерой измеряемого давления. Шкала прибора 4 для измерения ЭДС градуируется, как правило, в единицах давления. Данный принцип наиболее эффективен при давлениях от 0,1 до 100 Па. При давлениях, меньших 0,1 Па, все большая доля тепла передается излучением, а при давлениях, больших 100 Па, увеличение теплопроводности газа резко замедляется. В обоих случаях существенно уменьшается чувствительность прибора. Погрешность измерений составляет 10–30 %. На градуировочную характеристику существенно влияет состав газа. Поэтому для уточнения показаний термопарного манометра необходима индивидуальная градуировка.



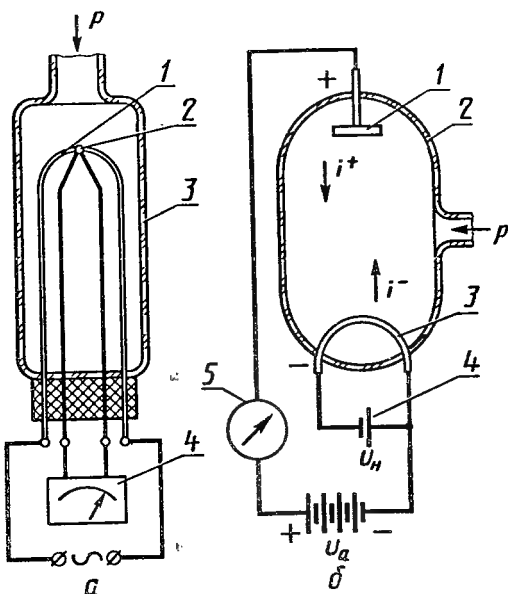


Рис. 54. Термопарный манометр

Принцип действия ионизационного манометра основан на зависимости от давления тока положительных ионов, образованных в результате ионизации разреженного газа. Ионизация газа осуществляется электронами, ускоряемыми электрическим или магнитным полями, а также посредством излучения радиоизотопов. При одном и том же количестве электронов, пролетающих через газ, или постоянной мощности излучения степень ионизации газа пропорциональна концентрации его молекул, т. е. измеряемому давлению.

В простейшем случае наиболее употребим ионизационный манометр с горячим катодом (рис. 54,

б), содержащий стеклянную колбу 2, в которую впаяны анод 1 и катод 3. Благодаря разогреву катода источником постоянного тока 4, его поверхность испускает электроны, которые разгоняются напряжением  $U_a$  между катодом и анодом и ионизируют находящийся между ними газ. Сила тока положительных ионов, измеряемая гальванометром 5, является мерой измеряемого давления

$$p = k \cdot \frac{i^+}{i^-},$$

где  $k$  — постоянная, зависящая от конструкции прибора и состава газа.

Для увеличения степени ионизации между катодом и анодом помещена сетка, на которую подается напряжение, сообщаемое дополнительное ускорение потоку электронов. Манометры этого типа охватывают диапазон от  $10^{-7}$  до 1 Па, дополняя диапазон измерений термопарного манометра. Погрешности измерений составляют также 10–30 %.

#### Контрольный вопрос № 10

Зависят ли показания термопарного вакуумметра от физических свойств газов, давление которых необходимо измерить?

Если „да” — см. с. 125, если „нет” — см. с. 127.

## Глава 6. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

## 6.1. Агрегатные состояния вещества

Все вещества, встречающиеся в природе, могут находиться в твердом, жидком и газообразном состояниях, определяемых молекулярными силами и подвижностью частиц.

Обычно в гидромеханике жидкие и газообразные вещества объединяют в едином понятии „жидкости”. В отличие от твердых тел они способны изменять свою форму под действием даже очень малых сил. Так, под действием собственного веса жидкость течет, если это возможно.

Жидкости по своим механическим свойствам разделяют на мало-сжимаемые (капельные) и сжимаемые (газообразные).

Капельные жидкости имеют определенный объем, который практически не меняется под действием приложенных сил. Газы же, занимая все предоставляемое им пространство, могут существенно изменять свой объем, сжимаясь и расширяясь под действием сил.

Таким образом, капельные жидкости (в отличие от твердых тел) легко изменяют свою форму и (в отличие от газов) с трудом изменяют свой объем. Газы же легко изменяют как свою форму, так и объем.

Пар — одна из разновидностей газообразных веществ, отличающаяся неустойчивостью агрегатного состояния. При изменении температуры, давления или объема пар может частично переходить из газообразного состояния в жидкое и наоборот. Если для этого перехода достаточно очень незначительных изменений температуры, давления или объема, то пар называют насыщенным. Если пар содержит жидкую фазу в виде мелких капель или тумана, его называют влажным. Пар, в котором полностью отсутствует жидкая фаза (капли или туман), называется сухим насыщенным паром. Если температура пара выше температуры сухого насыщенного пара при том же давлении, его называют перегретым. В отличие от насыщенного пара он обладает некоторой устойчивостью своего агрегатного состояния, т. е. для появления жидкой фазы необходимы более значительные изменения температуры или давления.

## К контрольному вопросу № 10

Вы правы. По принципу действия температура спая термopары, нагреваемая постоянным током, зависит от теплопроводности окружающей среды, которая в свою очередь зависит от физических свойств газа.

## Основные характеристики потока

Жидкости двигаются (текут) сплошным потоком, ограниченным стенками трубы, канала или свободной поверхностью. При этом скорости движения различных частиц жидкости, распределенных по сечению потока, отличаются друг от друга: у стенки трубы они равны нулю и максимальны на ее геометрической оси. Это обуславливается, во-первых, тормозящим действием стенок; во-вторых, внутренним трением слоев жидкости, которое зависит от ее вязкости. Поэтому в качестве обобщенной количественной характеристики потока используют среднюю (осредненную по всем элементарным частицам) по сечению скорость  $v_{\text{ср}}$  движения жидкости.

Потоки жидкости по качественным признакам делят на установившиеся и неуставившиеся, равномерные и неравномерные, ламинарные (безвихревые) и турбулентные (вихревые).

Поток называется установившимся, если средняя скорость и расход в данном (одном и том же) сечении потока не меняются во времени.

Поток, не удовлетворяющий этому требованию, называется неуставившимся.

Установившимся потоком может быть истечение жидкости из отверстия в стенке резервуара при постоянном напоре; при переменном напоре истечение жидкости будет неуставившимся.

Частным случаем неуставившегося потока являются пульсирующий поток, характеризуемый пульсациями средней скорости. При этом амплитуда и частота пульсаций могут быть как детерминированными (определенными) величинами (например, пульсации, обусловленные насосной подачей жидкости), так и случайными величинами (например, пульсации, обусловленные турбулентным характером течения жидкости).

Полностью установившиеся (не пульсирующие) потоки жидкости в природе практически не встречаются. В искусственных условиях (например, на образцовых расходомерных установках) полностью устранить пульсации и так называемое „плавание” расхода также не удастся.

Если амплитудно-частотные изменения расхода заметно не влияют на характер рассматриваемого явления, то поток называют квазиставившимся.

Поток называется равномерным, если средняя скорость остается неизменной во всех сечениях по его длине; в противном случае поток называется неравномерным. Таким образом, установившимся называется поток, неизменный во времени, но изменяющийся в пространстве, а равномерным — поток, неизменный в пространстве.

По внутренней структуре, характеру течения жидкости потоки разделяют на ламинарные и турбулентные. При ламинарном потоке элементарные струйки (слои) жидкости движутся, не перемешиваясь, параллельно друг другу. Эпюра (распределение) скоростей по сечению ламинарного потока в цилиндрических трубах формируется под действием сил вязкостного трения и имеет форму параболы. Максимальная скорость на оси трубы равна удвоенной средней скорости.

Для турбулентных потоков характерно хаотическое перемещение (как осевое, так и радиальное) частиц жидкости, образование „вихревых волчков” и пульсаций. При этом за счет интенсивного перемешивания слоев жидкости эпюра скоростей выравнивается. Максимальная скорость в зависимости от диаметра и шероховатости трубы составляет 1,16–1,27 средней скорости.

Ламинарные потоки характерны для течений с небольшими скоростями жидкостей большой вязкости и малой плотности по трубам малого диаметра. Наоборот, большие скорости течения, большие диаметры труб, малая вязкость и большая плотность жидкости характеризуют условия турбулентного потока. Вследствие этого, критерием, однозначно определяющим ламинарный или турбулентный характер потока, является безразмерная величина (число Рейнольдса)

$$Re = \frac{v_{cp} \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (6.1)$$

где  $d$  — диаметр трубопровода;  $\rho$  — плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости жидкости,  $\text{Н·с/м}^2$ .

Критическое число Рейнольдса ( $Re_{кр}$ ), при котором ламинарный поток переходит в турбулентный при течении жидкости в трубах нормальной шероховатости, равно 2320. Если  $Re < 2320$ , то поток ламинарный; если  $Re > 2320$  — поток турбулентный.

#### К контрольному вопросу № 10

Вы ошиблись. Еще раз прочтите разд. 2.5.

В большинстве случаев в практике измерений расхода жидкостей, текущих по трубам, встречаются турбулентные потоки. Точность измерений расхода ламинарных потоков значительно меньше, чем измерений расхода турбулентных потоков. Это связано, во-первых, с более равномерным распределением скоростей по сечению турбулентного потока и, во-вторых, с явлением автомодельности.

В общем случае (когда отсутствует явление автомодельности) при движении жидкости по трубам коэффициенты гидравлического трения, коэффициенты сопротивления обтекаемых тел, коэффициенты расхода при истечении из отверстий и насадок и другие зависят от числа Рейнольдса. Однако, если числа Рейнольдса становятся больше некоторых предельных значений ( $Re_{пр}$ ), все эти коэффициенты, обычно входящие в рабочие уравнения существующих расходомеров, приобретают постоянные и независимые от числа Рейнольдса значения.

Область, в которой гидравлические и рабочие коэффициенты приборов для измерения расхода постоянны, называется автомодельной.

Обычно  $Re_{пр} \geq Re_{кр}$ , поэтому измерения в турбулентных потоках (в связи с постоянством рабочих коэффициентов приборов) более точны, чем в ламинарных. Учитывая это обстоятельство, в некоторых случаях искусственно турбулизируют поток (различного рода возмущающими поток устройствами) в местах установки расходомеров.

Однако измерения в турбулентных потоках имеют свои специфические трудности. Если существующая теория ламинарных потоков, базирующаяся на законе внутреннего трения Ньютона, позволяет достаточно точно теоретически решать большинство прикладных измерительных задач, то строгое теоретическое описание явлений, происходящих в турбулентных потоках, в связи с их необычайной сложностью до настоящего времени отсутствует.

Существенное значение для характеристики турбулентного потока имеет число (критерий) Кармана, равный отношению среднего квадратического значения пульсаций продольной („актуальной”) скорости  $\sigma_v$  к ее среднему значению  $v_{cp}$ :  $K_v = \sigma_v / v_{cp}$ .

Значение  $K_v$  определяет интенсивность турбулентности, значение турбулентных возмущений потока, зависящих как от свойств среды (в общем случае от числа Рейнольдса), так и от свойств, ограничивающих поток стенок (размеров и формы микровыступов на поверхности стенок, соприкасающихся с текущей средой).

Естественно, чем больше относительное значение микровыступов (коэффициент шероховатости стенок  $k_{ш} = \bar{h}/d$ , где  $\bar{h}$  — осредненная по сечению и длине трубопровода высота микровыступов), тем больше энергии потока переходит в энергию турбулентных пульсаций и тем больше  $K_v$ .

Потери энергии потока характеризуются величиной  $\lambda v_{cp}^2 / 2g$ , где  $\lambda$  — коэффициент гидравлического трения трубопровода. Ясно, что в общем случае между величинами  $k_{ш}$ ,  $K_v$ ,  $Re$  и  $\lambda$  существуют определенные функциональные зависимости.

В гидрометрической практике различают два вида трубопроводов: гидравлически гладкие, для которых коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  (и  $K_v$ ) зависит лишь от числа  $Re$  и не зависит от  $k_{ш}$  (ввиду его относительной малости), и шероховатые трубы, для которых  $\lambda$  зависит лишь от  $k_{ш}$  и не зависит от  $Re$ .

подавляющее большинство трубопроводов испытательных участков расходомерных стендов и измерительных участков эксплуатационных систем имеют достаточно малую (менее 0,005) относительную шероховатость и являются гидравлически гладкими в широком диапазоне чисел  $Re$ .

Тем не менее, при выборе материалов этих участков, технологии их изготовления и обработки так же, как и при обосновании сроков их эксплуатации, вопросы гидравлического трения не следует упускать из виду.

Существенное значение для расходоизмерительной практики имеет и такая характеристика потока, как его „осесимметричность”. Эпюра скоростей равномерного установившегося потока в длинном прямом участке трубопровода (будь то ламинарный или турбулентный поток) симметрична относительно оси трубы, где скорость максимальна. Такой поток называют осесимметричным. Различные местные сопротивления (колена, задвижки, вентили, тройники и т. п.) искажают нормальную (осесимметричную) эпюру скоростей, смещают максимальную скорость с оси трубы. Такие потоки называют „неосесимметричными” или потоками с „искаженной структурой”.

Кроме того, некоторые местные сопротивления (например, пространственные колена) создают и „закрутку” потока, придавая ему вращательное движение.

Искажения эпюры скоростей (неосесимметричность), вращение потока вносят дополнительные погрешности при измерении расхода, зависящие от метода измерений и типа расходомера, а также от длины прямого участка от расходомера до ближайшего местного сопротивления (перед и за расходомером).

Заметим, что „искаженная” местным сопротивлением эпюра скоростей потока постепенно на некотором участке, называемым участком стабилизации, восстанавливается и затем формируется нормальное, характерное для данного режима течения осесимметричное распределение скоростей. Вследствие этого стремятся устанавливать расходомеры таким образом, чтобы расстояние от мест их монтажа до источника искажения потока было больше длины участка стабилизации, а если это не удастся то вводят соответствующие коррективы на погрешность расходомера.

Взаимосвязь основных физических параметров, характеризующих потоки жидкостей, описывается двумя фундаментальными уравнениями гидромеханики — уравнением неразрывности и уравнением Бернулли.

Из условия неразрывности (сплошности) потока следует равенство количества жидкости, протекающей через любое поперечное сечение потока за любой промежуток времени. В противном случае между сечениями образовывались бы разрывы и пустоты.

Следовательно, для двух произвольных сечений потока площадью  $F_1$  и  $F_2$  условие (уравнение) неразрывности может быть записано в виде

$$F_1 \cdot v_{cp1} \cdot \rho_1 = F_2 \cdot v_{cp2} \cdot \rho_2. \quad (6.2)$$

Для капельных (несжимаемых) жидкостей, приняв  $\rho_1 = \rho_2$ , уравнение (6.2) можно упростить

$$F_1 \cdot v_{cp1} = F_2 \cdot v_{cp2}. \quad (6.3)$$

В любых процессах, происходящих в природе, может меняться лишь форма энергии, но не ее количество. Это непоколебимый закон физики — закон сохранения энергии.

Аналитическое выражение закона сохранения энергии в потоках жидкости впервые было получено Даниилом Бернулли.

По аналогии с механикой твердого тела полная энергия движущейся жидкости состоит из кинетической и потенциальной. Потенциальная энергия определяется энергией положения и энергией упругого состояния. Сжатый газ может совершать работу (если дать возможность ему расширяться). Мерой этой „возможной” работы и будет потенциальная энергия упругого состояния.

Если масса жидкости  $m$  обладает скоростью  $v_{cp}$ , то ее кинетическая энергия определяется по формуле  $\mathcal{E}_k = mv_{cp}^2/2$ .

Удельная кинетическая энергия (энергия единицы массы жидкости) при этом

$$\mathcal{E}_{ky} = \frac{v_{cp}^2}{2}. \quad (6.4)$$

Удельная потенциальная энергия положения массы жидкости, расположенной на высоте  $z$ , отсчитываемой от любой условной плоскости

$$\mathcal{E}_{\text{п}} = gz. \quad (6.5)$$

Если масса жидкости занимает объем  $V$  и находится под давлением  $p$ , то запас потенциальной энергии, обусловленной упругим состоянием жидкости, определяют по формуле  $\mathcal{E}_y = pV$ .

При этом удельная потенциальная энергия, обусловленная упругим состоянием массы жидкости  $\mathcal{E}_{yy} = p \cdot V/m$ , а так как  $m = V\rho$ , то окончательно

$$\mathcal{E}_{yy} = \frac{p}{\rho}. \quad (6.6)$$

Просуммировав выражения (6.4) – (6.6), найдем запас полной удельной механической энергии, которую несет в себе единица массы движущейся жидкости

$$\mathcal{E}_y = \frac{v_{\text{ср}}^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho}. \quad (6.7)$$

Если пренебречь потерями на трение (при идеальной жидкости), то математическое выражение закона сохранения энергии для этого случая будет иметь вид

$$\mathcal{E}_y = \frac{v_{\text{ср}}^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = \text{const.} \quad (6.8)$$

Уравнение (6.8) называется уравнением Бернулли для установившегося, осесимметричного потока невязкой (идеальной) жидкости.

Из этого уравнения следует, что для любых сечений  $I$  и  $II$  потока идеальной жидкости справедливо равенство

$$z_1 + \frac{v_{\text{ср}1}^2}{2g} + \frac{p_1}{g\rho_1} = z_2 + \frac{v_{\text{ср}2}^2}{2g} + \frac{p_2}{g\rho_2}, \quad (6.9)$$

где  $z$  – геометрическая высота центра тяжести сечения потока над отсчетной плоскостью;  $p/\rho g = p/\gamma$  – пьезометрическая высота или статический напор;  $v_{\text{ср}}^2/2g$  – скоростная высота или скоростной (динамический) напор.

При течении реальных жидкостей вследствие потерь на вязкостное трение полная механическая энергия потока будет убывать. Это обстоятельство учитывается введением в уравнение (6.9) дополнительного члена  $\lambda^1 v_{\text{ср}2}^2/2g$ , выражающего потерю скоростного напора в зависимости от вида сопротивления.

Тогда (при течении реальных жидкостей) уравнение Бернулли принимает вид

$$z_1 + \frac{v_{\text{ср}1}^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_1} = z_2 + \frac{v_{\text{ср}2}^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_2} + \lambda^1 \frac{v_{\text{ср}2}^2}{2g}, \quad (6.10)$$

где  $\lambda'$  — приведенный (к сечению  $II$ ) коэффициент гидравлического сопротивления, характеризующий как потери напора по длине потока (между сечениями  $I$  и  $II$ ), так и местные потери, связанные с деформациями потока при обтекании тел, сужениях, поворотах и т. п.

Уравнение неразрывности потока и уравнение Бернулли — два фундаментальных уравнения механики жидкостей, которые положили начало созданию научнообоснованных методов измерения расхода и до настоящего времени не потеряли своего прикладного значения в измерительной практике и приборостроении.

### 6.3. Расход жидкости. Основные понятия

Расходом называется количество жидкости, протекающее через поперечное сечение потока в единицу времени.

В зависимости от единиц измерения количества жидкости расход может быть объемным  $Q$  (в  $\text{м}^3/\text{с}$ ) или массовым  $M$  (в  $\text{кг}/\text{с}$ ).

Массовый и объемный расходы связаны зависимостью, аналогичной зависимости между массой и объемом вещества

$$M = \rho Q. \quad (6.11)$$

Если использовать приведенное выше понятие средней скорости ( $v_{\text{ср}}$ ) потока, то объемный расход может быть выражен как

$$Q = v_{\text{ср}} \cdot F, \quad (6.12)$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения потока.

Так как для неустановившихся потоков средняя скорость случайным образом изменяется во времени, то и расход в общем случае является случайной величиной, а точнее — случайным процессом. При этом возможно измерять (и измеряют) лишь отдельные статистические характеристики этого процесса, а именно, мгновенный расход — значение расхода в данный момент времени; средний расход — осредненное за какой-либо промежуток времени значение расхода; „пиковый” расход — максимальное значение расхода, которое наблюдалось на заданном отрезке времени.

Мгновенные расходы измеряют, как правило, при управлении технологическими процессами, обеспечении оптимальных режимов работы энергетических установок и тепловых двигателей; средние расходы — при испытаниях, определении „расходных характеристик” объектов и процессов (например, при оценках удельных расходов топлива различных двигателей, дебита нефтяных и газовых скважин и т. п.), при учетных операциях. И наконец, „пиковые” расходы характерны для исследовательских работ, связанных с долгосрочными прогнозами поведения грунтовых и сточных вод, паводковых явлений в открытых каналах и руслах.



Технические устройства, предназначенные для измерения массового или объемного расхода, называют расходомерами. При этом в зависимости от того, для измерения какого (объемного или массового) расхода предназначены расходомеры, их подразделяют на объемные и массовые.

Существует много различных признаков, по которым можно классифицировать расходомеры (например, по точности, диапазонам измерений, виду выходного сигнала и т. п.). Однако наиболее общей является классификация по принципам измерений, по тем физическим явлениям, с помощью которых измеряемая величина преобразуется в выходной сигнал первичного преобразователя расходомера.

По принципу измерений расходомеры классифицируют по следующим основным группам (указываемый для каждой классификационной группы расходомеров принцип преобразования относится к их первичным преобразователям — датчикам).

1. Расходомеры переменного перепада давления (с сужающими устройствами; с гидравлическими сопротивлениями; центробежные; с напорными устройствами; струйные), преобразующие скоростной напор в перепад давления.
2. Расходомеры обтекания (расходомеры постоянного перепада — ротаметры, поплавковые, поршневые, гидродинамические), преобразующие скоростной напор в перемещение обтекаемого тела.
3. Тахометрические расходомеры (турбинные с аксиальной или тангенциальной турбиной; шариковые), преобразующие скорость потока в угловую скорость вращения обтекаемого элемента (лопастей турбинки или шарика).
4. Электромагнитные расходомеры, преобразующие скорость движущейся в магнитном поле проводящей жидкости в ЭДС.
5. Ультразвуковые расходомеры, основанные на эффекте увлечения звуковых колебаний движущейся средой.
6. Инерциальные расходомеры (турбосиловые; кориолисовы; гироскопический), основанные на инерционном воздействии массы движущейся с линейным или угловым ускорением жидкости.
7. Тепловые расходомеры (калориметрические; термоанемометрические), основанные на эффекте переноса тепла движущейся средой от нагретого тела.
8. Оптические расходомеры, основанные на эффекте увлечения света движущейся средой (Физо-Френели) или рассеяния света движущимися частицами (Допплера).
9. Меточные расходомеры (с тепловыми, ионизационными, магнитными, концентрационными, турбулентными метками), основанные на измерении скорости или состоянии метки при прохождении ее между двумя фиксированными сечениями потока.

Естественно, приведенная классификация, не полная и неисчерпывающая, поскольку с каждым годом появляются новые методы и средства измерений расхода.

В отечественной практике наибольшее распространение получили расходомеры первых пяти групп (переменного и постоянного давления, тахометрические, электромагнитные и ультразвуковые). Эти расходомеры выпускаются серийно и находят применение практически во всех отраслях народного хозяйства. Расходомеры остальных групп используются пока, в основном, для решения специальных измерительных задач (при научных исследованиях, в медицине, криогенике, при измерениях агрессивных и токсичных сред и т. п.), изготавливаются единичными экземплярами или малыми партиями и являются на сегодняшний день нестандартизованными средствами измерений.

Современная измерительная практика предъявляет все более высокие требования к точности, надежности, быстродействию, функциональности расходомеров. Следует отметить, что в большинстве случаев эти требования противоречивы, т. е. улучшение одних характеристик, как правило, достигается за счет недореализации возможностей улучшения других. Так, увеличение функциональных возможностей приборов за счет усложнения снижает их надежность вследствие возрастания числа подверженных отказам элементов. Увеличение быстродействия снижает эффективность систем автоматической компенсации медленно меняющихся погрешностей, вызванных влиянием внешней среды, параметров измеряемых объектов и т. п. Поэтому развитие измерительной техники, в том числе и расходоизмерительной, сопровождается постоянным поиском разумного компромисса между реализуемыми свойствами приборов, техническими возможностями и экономической целесообразностью. При этом следует иметь в виду, что и „грубые”, относительно низкоточные, но недорогие средства измерений всегда будут иметь достаточно большой промышленный спрос, поскольку способны удовлетворить определенный класс практических измерительных задач. Однако резкое повышение точности измерений было и остается важнейшей задачей развития расходоизмерительной техники.

Значительная часть серийно выпускаемых расходомеров имеет класс точности (приведенную погрешность) 1—1,5 %. Если принять, что измерения преимущественно проводятся в середине шкалы, относительная погрешность этих измерений составляет 2—3 %. С учетом же влияния различных дестабилизирующих факторов действительная погрешность будет еще больше.

В то же время для эффективного управления технологическими процессами в нефтяной, газовой, химической отраслях промышленности, энергетическими и транспортными установками, для учетных операций уже сегодня требуется на порядок более высокая точность измерений расхода. Именно это обстоятельство обуславливает необходимость создания и внедрения расходомеров, имеющих класс не хуже 0,1—0,3 %.

Характерная особенность расходоизмерительной практики — чрезвычайно широкая номенклатура измеряемых веществ, имеющих различные

физико-химическим свойства — плотность, вязкость, температуру, фазовый состав и структуру. Поэтому в этой области измерений особенно остро стоит проблема создания приборов инвариантных (малочувствительных) к физико-химическим свойствам измеряемых сред, к неинформативным параметрам входного сигнала.

Изыскание новых принципов стабилизации функции преобразования, использование систем автоматической коррекции показаний, введения поправок — таковы основные направления технического поиска решения этой проблемы.

## Глава 7. ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

### 7.1. Расходомеры переменного перепада давления.

#### Принцип действия. Уравнения измерений

Принцип действия расходомеров данного типа, объединенных единым методом измерений, основан на измерении перепада давления, образующегося в результате местного изменения скорости потока жидкости, газа или пара.

Метод переменного перепада давления один из наиболее старых и изученных методов измерения расхода. Это, а также возможность косвенной градуировки и поверки стандартизованных первичных преобразователей — сужающих устройств, реализующих метод, их простота и надежность, серийный выпуск вторичных преобразователей — дифманометров обусловило его чрезвычайно широкое (преимущественное по сравнению с другими) использование в практике промышленных измерений расхода. И вместе с тем в основе этого чисто гидродинамического метода лежат столь сложные физические процессы деформации потоков, столь большое число неконтролируемых факторов влияет на характер этих процессов, что применение его в настоящее время ограничено областями, где требуется относительно низкая точность измерений, хотя возможности его „метрологического совершенствования” далеко не исчерпаны.

Рассмотрим идеальную физическую картину явлений, лежащих в основе метода измерения расхода по перепаду давления на сужающем устройстве.

На рис. 55 показана форма потока несжимаемой жидкости, протекающей через диафрагму. Выделим в трубопроводе два сечения:  $I-I$  — перед сужающим устройством там, где поток еще не меняет своей конфигурации, и  $II-II$  — в месте наибольшего сжатия потока, находящемся на некотором расстоянии от внешнего (по ходу потока) торца диафрагмы.

Обозначим  $F$  — площадь поперечного сечения трубопровода,  $m^2$ ;  $F_0$  — площадь отверстия диафрагмы,  $m^2$ ;  $m = F_0/F$  — относительная площадь сужающего устройства;  $F_1$  — площадь сечения потока в месте его наибольшего сжатия,  $m^2$ .

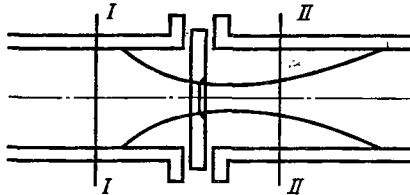


Рис. 55. Форма потока жидкости, протекающей через диафрагму

Для сечений  $I-I$  и  $II-II$  горизонтального установившегося потока несжимаемой жидкости плотностью  $\rho$  уравнение Бернулли будет иметь вид

$$\frac{\rho v_{\text{ср}2}^2}{2} - \frac{\rho v_{\text{ср}1}^2}{2} = p_1 - p_2, \quad (7.1)$$

а уравнение неразрывности

$$F v_{\text{ср}1} = F_1 v_{\text{ср}2} = \mu' F_0 v_{\text{ср}2}, \quad (7.2)$$

где  $\mu' = F_1/F_0$  — коэффициент сжатия потока, зависящий от вида сужающего устройства;  $v_{\text{ср}1}$  и  $v_{\text{ср}2}$  — средние скорости потока в сечениях  $I-I$  и  $II-II$  соответственно;  $p_1$  и  $p_2$  — абсолютные давления в сечениях  $I-I$  и  $II-II$  соответственно.

Решая совместно уравнения (7.1) и (7.2), получим выражение для средней скорости потока в сечении  $II-II$

$$v_{\text{ср}2} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\mu')^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}. \quad (7.3)$$

Объемный расход можно выразить через среднюю скорость потока

$$Q = \mu' F_0 v_{\text{ср}2}. \quad (7.4)$$

Подставив в выражение (7.4) значение средней скорости  $v_{\text{ср}2}$ , определенное по формуле (7.3), найдем уравнение измерений расхода идеальной несжимаемой жидкости в единицах объема ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) и массы ( $\text{кг}/\text{с}$ ):

$$Q = \frac{\mu'}{\sqrt{1 - (\mu')^2 m^2}} F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}; \quad (7.5)$$

$$M = \frac{\mu'}{\sqrt{1 - (\mu')^2 m^2}} F_0 \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)}. \quad (7.6)$$

При течении реальных измеряемых сред возникают дополнительные (не учтенные в приведенных выше формулах) физические явления, например, потери давления на вязкостное трение, вихревые сопротивления, неравномерное распределение скоростей, изменение плотности и т. п.

Учитывая эти обстоятельства, а также несовпадение мест реального отбора давлений с базовыми сечениями  $I-I$  и  $II-II$  (обычно перепад давления измеряется в углах, образованных стенками трубы с торцами диафрагмы), для получения уточненных общих уравнений расхода правые части формул (7.5) и (7.6) умножают на скоростной коэффициент  $\xi$ , характеризующий распределение скоростей по сечению выходящего из сужающего устройства потока, и коэффициент  $\epsilon$ , учитывающий изменение плотности потока газа или пара при течении через сужающее устройство.

Тогда уравнения расхода приобретают вид

$$Q = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}; \quad (7.7)$$

$$M = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)}, \quad (7.8)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{\mu' \xi}{\sqrt{1 - (\mu')^2 m^2}}.$$

Эти уравнения являются общими для всех расходомеров переменного перепада давления и пригодными для сжимаемой и несжимаемой сред. Для несжимаемой среды  $\epsilon = 1$ .

Коэффициент  $\alpha$ , входящий в уравнения (7.7) и (7.8), называется коэффициентом расхода. Этот коэффициент зависит от относительной площади  $m$  сужающего устройства. С его помощью учитывают сложные гидродинамические явления, происходящие в потоке при изменении его конфигурации.

Не принимая во внимание действие сил тяжести на поток (при течении измеряемой среды по трубе с дозвуковыми скоростями такая идеализация допустима),

на основании соображений, приведенных в предыдущей главе, можно утверждать, что явления, происходящие в установившемся, слабо пульсирующем и невращающемся потоке, однозначно определяются критерием подобия Рейнольдса. А если это так, то и коэффициент  $\alpha$ , учитывающий эти явления, функционально зависит от числа Рейнольдса.

На рис. 56 показаны графики изменения исходных (для условий установившегося, не пульсирующего и не вращающегося потока, при от-

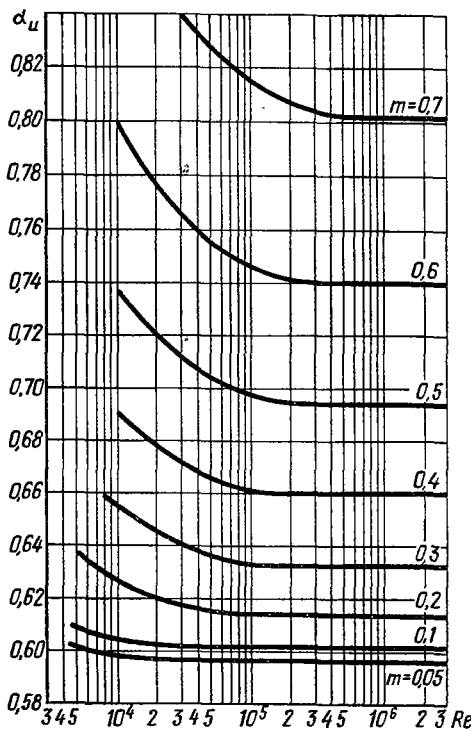


Рис. 56. Графики изменения исходных коэффициентов расхода нормальных диафрагм

сутствии близко расположенных местных сопротивлений) коэффициентов расхода нормальных диафрагм для различных значений  $m$  в зависимости от чисел Рейнольдса.

Как видно из рисунка, коэффициенты расхода остаются постоянными для одних и тех же  $m$  при  $Re$ , больших некоторых предельных значений  $Re_{пр}$ , т. е. там поток приобретает автомодельный характер. Наличие автомодельной области ( $Re > Re_{пр}$ ) позволяет градуировать сужающие устройства, для которых составлены таблицы значений  $\alpha$  косвенным расчетным методом.

Естественно, если условия, при которых определены  $\alpha$ , изменяются в процессе эксплуатации расходомера с сужающим устройством (например, если появляются существенные пульсации или вращательное движение потока, нет достаточных длин прямых участков перед расходомером), то исходные коэффициенты расхода необходимо корректировать, вводя соответствующие поправки или внося коррективы на точность измерений расхода.

Как следует из уравнений (7.7) и (7.8), расход ( $Q$  или  $M$ ) и перепад давления ( $\Delta p = p_1 - p_2$ ) функционально связаны квадратичной параболической зависимостью. Отсутствие линейной пропорциональности между объектом измерения ( $\Delta p$ ) и измеряемым параметром ( $Q$  или  $M$ ) является основным методическим недостатком расходомеров переменного перепада давления.

Из приведенных выше методических предпосылок следует, что для измерения расхода жидкостей, газов и паров по перепаду давления необходимы три устройства, объединенные общим понятием расходомер переменного перепада:

устройство, создающее перепад давления в потоке измеряемой среды за счет местного изменения скорости потока или по значению (сужающие устройства), или по направлению (изогнутые участки трубы);

измерительный прибор — дифманометр, измеряющий перепад давления;

соединительное устройство, передающее перепад давления от потока к дифманометру.

Иногда к ним добавляются еще вторичный преобразователь, преобразующий показания дифманометра в электрический, пневматический или частотный сигнал, и вторичный прибор для регистрации этого сигнала.

**Стандартные типы сужающих устройств.** В настоящее время наиболее распространены стандартные сужающие устройства трех типов: нормальная диафрагма, нормальное сопло и труба (сопло) Вентури.

**Нормальная диафрагма.** При угловом отборе давления применяют нормальные диафрагмы двух видов — плоские (рис. 57) и камерные (рис. 58).

Нормальная диафрагма представляет собой тонкий диск с отверстием, concentричным оси трубы, с острой прямоугольной кромкой со стороны входа потока.

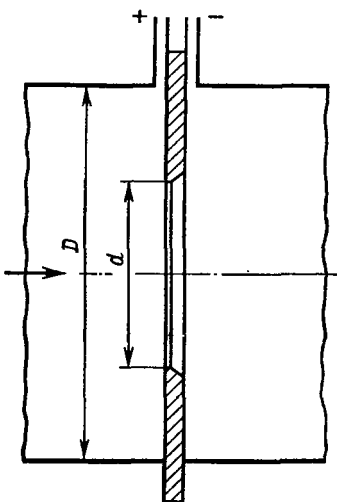


Рис. 57. Плоская диафрагма

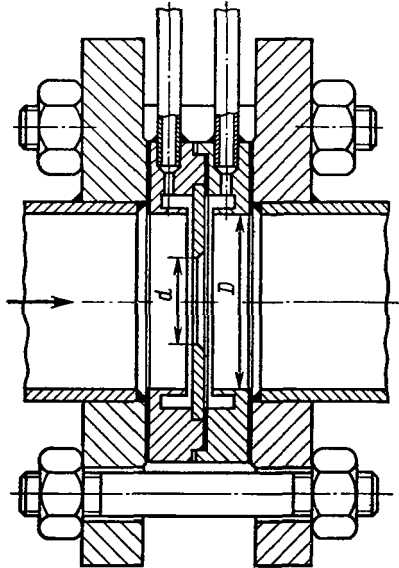


Рис. 58. Камерная диафрагма

Соосность установки диафрагмы, острота входной кромки, формирующей определенный характер течения измеряемой среды через отверстие диафрагмы, ее прямоугольность и технологический допуск на входной диаметр диафрагмы  $d$  определяют возможность и точность косвенной (расчетной) градуировки расходомеров переменного перепада с нормальными диафрагмами. Поэтому к этим параметрам диафрагмы предъявляют весьма высокие требования. Так, допустимое отклонение оси отверстия диафрагмы от оси трубы не должно превышать  $0,015 D (D/d - 1)$ , где  $D$  — диаметр трубопровода.

Диаметр отверстия диафрагмы  $d$  не должен отличаться от расчетного более чем на  $\pm (0,001 - 0,05) \%$  при  $m \leq 0,45$  и на  $\pm (0,005 - 0,05) \%$  при  $m > 0,45$ . Этим обеспечивается геометрическое подобие диафрагм.

Закругление, смятие или затупление входной кромки диафрагмы не допустимы, что обеспечивает идентичность характера течения измеряемых сред через однотипные диафрагмы.

Давления у плоской диафрагмы отбирают с помощью отдельных сверлений. Для усреднения давлений пробурливают несколько отверстий, равномерно распределенных по окружности трубы в плоскостях отбора давлений. Выходящие из отверстий трубки объединяются двумя сборными коллекторами, от которых давления передаются к дифманометру.

Давления у камерных диафрагм отбирают из камер, соединенных с трубой кольцевыми щелями.

Преимущество камерных диафрагм является отбор действительных средних давлений и в связи с этим несколько менее жесткие требования к длине прямолинейных участков трубопровода до и после диафрагмы; недостатком — необходимость специальных уплотнительных устройств для герметизации камер.

**Нормальное сопло.** Нормальное сопло (рис. 59) выполняют в виде насадка, имеющего входную сходящуюся часть, образованную дугами окружностей с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ , равными  $0,2d$  и  $d/3$  и цилиндрическую часть диаметром  $d$  и длиной  $0,3d$ .

Выходная кромка сопла, как и у диафрагмы, должна быть острой, без закруглений и заусенцев. Она предохранена на выходе нишей.

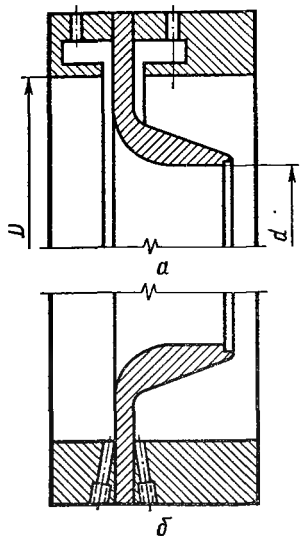


Рис. 59. Нормальное сопло

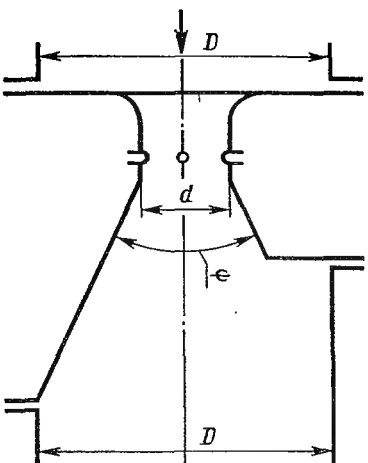


Рис. 60. Нормальная труба Вентури

Давления также можно отбирать или при помощи камер и кольцевых щелей (рис. 59, *а*) или через отдельные отверстия (рис. 59, *б*).

**Нормальная труба (сопло) Вентури.** Существуют нормализованные расходомерные трубы Вентури четырех конструктивных разновидностей: трубы Вентури с сопловым и коническим входами, с длинным и коротким диффузорами.

На рис. 60 изображена труба Вентури с сопловым входом (сопло Вентури) с длинным (снизу) и коротким (сверху) диффузорами.

Входная часть трубы до места отбора минусового (меньшего) давления имеет тот же профиль, что и нормальное сопло. Длина цилиндрической части составляет обычно  $(0,5-0,7)d$ . Угол входного конуса диффузора должен быть менее  $30^\circ$ .



Плюсовое (большее) давление отбирают как с помощью кольцевой камеры, так и с помощью отдельных сверлений; минусовое — с помощью отдельных сверлений.

Наличие стандартных сужающих устройств трех типов объясняется относительными эксплуатационными преимуществами и недостатками каждого из них. Так, диафрагмы технологически просты и в области  $m < 0,3$  имеют меньшие предельные числа Рейнольдса ( $Re_{пр}$ ), чем сопла и трубы Вентури. Кроме того, коэффициенты расхода диафрагм менее подвержены влиянию искажения профиля скоростей и пульсаций потока. В то же время потери давления в соплах и трубах Вентури (особенно в последних) значительно меньше, чем у диафрагм. Кроме того, точность измерения расхода газов и пара с помощью сопел в области диаметров трубопроводов, меньших 300 мм, выше, чем при использовании диафрагм (в связи с большим постоянством коэффициента сжимаемости  $\epsilon$  при применении сопел). Надежность сопел и труб Вентури, связанная с изменениями коэффициента расхода  $\alpha$  при износе или загрязнении входного профиля сужающего устройства, значительно выше, чем у диафрагм.

**Метрологические характеристики и область применения расходомеров переменного перепада давления.** Измерения расхода по переменному перепаду давления, создаваемому сужающими устройствами, относятся к косвенным.

Рабочей формулой измерений расходомеров данного типа в самом общем виде является

$$Q = k a_n k_{ш} k_o k_{Re} \epsilon d^2 k_t \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}, \quad (7.9)$$

где  $k$  — числовой коэффициент;  $a_n$  — исходный коэффициент расхода, значения которого для нормализованных сужающих устройств приводятся в соответствующих таблицах (например, в таблицах РД 50—213—80);  $k_{ш}$  — поправочный множитель на шероховатость трубопровода;  $k_o$  — поправочный множитель на остроту кромки у диафрагм;  $k_{Re}$  — поправочный множитель на вязкость измеряемой среды, который вводится в случае, если число Рейнольдса в трубопроводе несколько меньше предельного числа Рейнольдса для данного типа и относительной площади сужающего устройства;  $k_t$  — поправочный множитель на расширение сужающего устройства.

На основании формулы (7.9) по закону сложения средних квадратических погрешностей относительная средняя квадратическая погрешность измерения расхода  $\sigma_Q$  при соблюдении условий нормальной эксплуатации (при осесимметричном потоке с нормальной эпюрой скоростей и при отсутствии существенных пульсационных и вращательных составляющих скоростей)

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_{a_n}^2 + \sigma_{k_{ш}}^2 + \sigma_{k_o}^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_{\epsilon}^2 + \sigma_{k_t}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4} \sigma_{\rho}^2}. \quad (7.10)$$

Средняя квадратическая погрешность табличного значения исходного коэффициента расхода (экспериментальная погрешность при его оп-

ределения) зависит от относительной площади сужающего устройства. Значения этой погрешности для различных типов сужающих устройств колеблются в пределах от 0,2 до 0,7 %.

Значения средних квадратических погрешностей  $\sigma_{k_{ш}}$ ,  $\sigma_{k_o}$ ,  $\sigma_{k_{Re}}$  соответствующих поправочных множителей (погрешности их экспериментальной оценки) зависят от типа сужающего устройства, его относительной площади, диаметра трубопровода, чисел Рейнольдса и колеблются от 0 (при наиболее благоприятных условиях) до 1,5 %.

Напомним, что предельные значения погрешностей определения коэффициента сжатия  $\epsilon$  составляют 4(1 - S) % для диафрагм и 2(1 - S) % для сопел и труб Вентури.

Как правило, закон распределения действительных значений погрешностей определения  $\epsilon$  в пределах указанных допусков для однотипных сужающих устройств неизвестен и в этом случае, приняв его равновероятным, найдем  $\sigma_{\epsilon} = 2,3(1-S)$  % для диафрагм и  $\sigma'_{\epsilon} = 1,2(1-S)$  % для сопел и труб Вентури.

Следовательно, максимальные значения средней квадратической погрешности определения  $\epsilon$  (при  $S = 0$ ) соответствуют  $\sigma_{\epsilon_{\max}} = 2,3$  % для диафрагм,  $\sigma'_{\epsilon_{\max}} = 1,2$  % для сопел и труб Вентури, а минимальные (при  $S = 0,75$ )  $\sigma_{\epsilon_{\min}} = 0,58$  % и  $\sigma'_{\epsilon_{\min}} = 0,3$  % соответственно.

Далее,  $\sigma_d$  является средней квадратической погрешностью определения диаметра отверстия сужающего устройства.

В соответствии с принятыми нормами максимальная допускаемая погрешность измерения диаметра сужающего устройства равна  $\pm 0,1$  % от  $d$ .

Тогда, приняв, как и в предыдущем случае, равновероятное распределение погрешностей в пределах допуска, получим  $\sigma_d = 0,06$  %.

Средняя квадратическая погрешность определения коэффициента расширения сужающего устройства  $\sigma_{k_t}$  обычно мала по сравнению с другими составляющими (даже при  $T = 723$  К  $\sigma_{k_t} = 0,02$  %), поэтому, как правило, ею можно пренебречь. Среднюю квадратическую погрешность измерения перепада давления определяют по формуле

$$\sigma_{\Delta p} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(\Delta p)_{\max}}{(\Delta p)_{\text{ср}}} \delta_{\text{кл}},$$

где  $(\Delta p)_{\text{ср}}$  — среднее расчетное значение перепада давления, обычно принимаемое равным  $4/9 (\Delta p)_{\max}$ ;  $\delta_{\text{кл}}$  — максимальная приведенная погрешность дифманометра, определяемая его классом точности.

Формула также получена для условий равновероятного распределения погрешностей в пределах допуска для однотипной совокупности дифманометров.

Для обычных эксплуатационных дифманометров при соблюдении требований к их установке и обслуживанию  $\delta_{\text{кл}} = 1,0-1,5$  % и для дифманометров со вторичными приборами  $\delta_{\text{кл}} = 2,0-2,5$  %. Следовательно,  $\sigma_{\Delta p}$  колеблется в пределах от 1,3 до 3,2 %.

Средняя квадратическая погрешность  $\sigma_{\rho}$  характеризуется погрешностью расчетного значения плотности, взятого из соответствующих

справочных данных, изменением параметров, влияющих на плотность измеряемой среды, если отсутствуют корректирующие устройства, и не-точностью корректировочных поправок, если имеются корректирующие устройства. Для нормальных условий применения сужающих устройств  $\sigma_p = 0,1-1,0 \%$ . Нижнее значение (0,1 %) соответствует измерению чистых однофазных жидкостей, верхнее (1,0 %) — измерению расхода газов при незначительных колебаниях температуры и давления. При наличии устройств автоматической коррекции показаний дифманометров данная погрешность также будет лежать в пределах указанных граничных значений (несколько уменьшится лишь верхняя граница).

Определим теперь возможные пределы изменения суммарной средней квадратической погрешности измерения расхода с помощью расходомеров переменного перепада давления.

В лучшем случае — при измерении расхода жидкостей ( $\epsilon = 1$ ) и при отсутствии необходимости введения поправок на вязкость, шероховатость и острота кромки

$$\sigma_Q = \sqrt{0,25^2 + 4 \cdot 0,06^2 + 1/4 \cdot 1,30^2 + 1/4 \cdot 0,10^2} = 0,75 \%.$$

В наиболее неблагоприятных случаях (с учетом наибольших погрешностей всех поправочных коэффициентов) средняя квадратическая погрешность измерения расхода может достигать 3,0—4 %.

Таким образом, максимальная погрешность измерения расхода (при доверительной вероятности 0,95) с помощью расходомеров переменного перепада давления при нормальных условиях эксплуатации колеблется в пределах от 1,5 до 8 %.

Указанные пределы максимальных погрешностей измерений характерны для косвенных (расчетных) методов градуировки и поверки расходомеров с нормализованными типами сужающих устройств. При индивидуальной аттестации расходомеров совместно с подводящими участками трубопроводов и применении дифманометров повышенной точности основная погрешность этих расходомеров может быть снижена до 0,5—1 %.

Для нормальной работы сужающих устройств необходимы достаточного длинные прямые участки трубопровода, так как любые местные сопротивления (колена, угольники, конические вставки, вентили, задвижки и т. п.), вызывая искажение эпюры скоростей по сечению потока, его закручивание и дополнительные пульсации, приводят к отклонению действительных значений коэффициентов расхода от табличных (исходных) и, как следствие, к появлению дополнительных неконтролируемых в процессе измерений погрешностей.

Наименьшие необходимые длины прямых участков  $l_1$  перед (по ходу потока) сужающим устройством при отборе давлений через кольцевые камеры приведены на рис. 61 и 62. Если же давления отбирают через отдельные отверстия, то длина прямых участков должна быть увеличена вдвое по сравнению с длинами, указанными на этих рисунках.

Для местных сопротивлений, создающих винтовое движение потока, необходимая длина прямого участка может быть уменьшена за счет установки в трубопроводе перед сужающим устройством (на расстоянии не

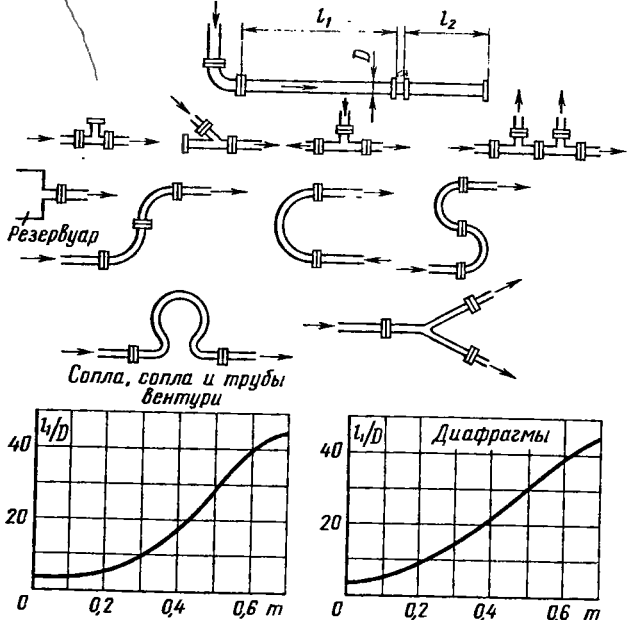


Рис. 61. Наименьшие допустимые длины прямых участков трубопровода от местных сопротивлений указанных видов до сужающего устройства

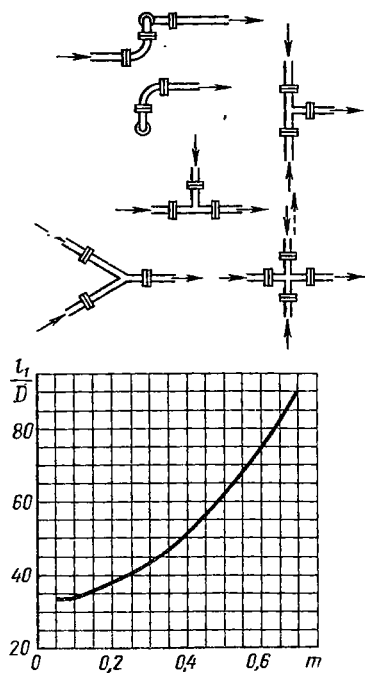


Рис. 62. Наименьшие допустимые длины прямых участков трубопровода от местных сопротивлений, создающих винтообразное движение потока, до сужающего устройства

менее  $2D$  от него) специальных струеыпрямителей, представляющих собой либо мелкоячеистые сетки, либо набор трубок, перекрывающих все сечения трубопровода. При этом следует иметь в виду, что струенаправляющие аппараты вызывают дополнительные (и немалые) потери напора в трубопроводе и требуют тщательного ухода в связи с возможностью засорения и износа.

Минимально допустимая длина прямого участка  $l_2$  за сужающим устройством зависит от его относительной площади и равна  $4D$  для  $m = 0,05$  и  $8D$  для  $m = 0,7$ .

Существующие нормализованные сужающие устройства с унифицированными табличными значениями исходных коэффициентов расхода применимы лишь для диаметров трубопровода больших 50 мм. Расходомеры переменного перепада на меньшие диаметры требуют индивидуальной градуировки, и в этом случае пропадает возможность их косвенной расчетной аттестации по унифицированным табличным данным. Кроме того, существенно возрастают погрешности, связанные с шероховатостью трубопровода, так как уменьшение диаметра ведет к увеличению относительной шероховатости. Поэтому расходомеры следует градуировать комплектно с эксплуатационными участками трубопровода.

Унифицированные табличные значения  $\alpha_n$  и формулы для расчета  $\epsilon$  пригодны при измерении расхода однофазных (чистых) сред и квазистационарных потоков. И хотя в практике сужающие устройства нередко используют для измерения расхода двухфазных сред (см. разд. 7.13) и измерения пульсирующих расходов (см. разд. 7.14) погрешности показаний расходомеров при этом (без их индивидуальной градуировки непосредственно на месте эксплуатации) невозможно пронормировать и оценить.

Измерение расходов с помощью нормализованных сужающих устройств в области малых чисел Рейнольдса (при малых диаметрах трубопроводов, вязких жидкостях, значительно нагретых газах и других) практически невозможно из-за непостоянства коэффициентов расхода (при  $Re < Re_{пр}$ ), а следовательно, и из-за невозможности нормирования и оценки реальной точности этих измерений. В практике для измерений расхода при малых числах Рейнольдса применяются некоторые модифицированные типы сужающих устройств, например, сопло с профилем „четверть круга“, двойная диафрагма, сегментная диафрагма, сопло с профилем „полукруг“ и т. п. Предельные числа Рейнольдса у этих сужающих устройств получаются несколько меньшими, чем у нормальных. Однако данные устройства требуют индивидуальной градуировки, как правило, непосредственно на месте эксплуатации, их погрешности в настоящее время не нормированы и применяют их в основном в качестве индикаторов.

Таким образом, область нормального (с определенными и нормированными погрешностями измерений) применения расходомеров переменного перепада давления ограничена измерением стационарных расходов однофазных жидкостей, сухого перегретого пара и сухих газов на трубопроводах диаметром более 50 мм с определенной длиной прямого

участка, при значительных числах Рейнольдса ( $Re > Re_{кр}$ ) и в тех случаях, когда допустимо изменение конфигурации потока.

Несмотря на эти ограничения и относительно малую точность, расходомеры переменного перепада получили преимущественное распространение в отечественной расходоизмерительной практике. По существу, они являются единственным типом стандартизованных расходоизмерительных устройств.

Они не требуют индивидуальной градуировки и аттестации, обладают унифицированными и взаимозаменяемыми элементами, применимы при значительных давлениях и температуре измеряемых сред. В случае необходимости изменения предела измерения в расходомере достаточно сменить сужающее устройство (изменить относительную площадь  $m$ ), наиболее же сложная и дорогостоящая часть прибора — дифманометр — остается неизменной. Для этого следует лишь изменить предел измерения дифманометра или сменить его шкалу.

Простота и надежность сужающих устройств, определяемая при правильной эксплуатации достаточно медленными процессами износа, коррозии и „зарастания” их входного профиля, также способствовали широкому распространению расходомеров переменного перепада.

И наконец, метрологические возможности (возможности повышения точности) расходомеров этого типа на сегодняшний день далеко не исчерпаны. Как показали проведенные в последние годы исследования, установка перед сужающими устройствами специально спроектированных насадков (конфузоров и диффузоров), обеспечивающих равномерное (прямоугольное) распределение скоростей по сечению потока, правильно „спланированный” набор взаимокompенсирующих возмущающих факторов (например, отсутствие необходимой длины прямого участка может частично компенсироваться „закруткой” потока и т. п.) в некоторых случаях могут существенно повысить точность расходомеров переменного перепада давления.

**Установка и обслуживание расходомеров переменного перепада давления.** Существенное влияние на правильность работы данных расходомеров оказывает взаимное расположение сужающего устройства и дифманометра, а также монтаж соединительных (импульсных) линий. Поэтому для нормальной работы расходомеров при их монтаже необходимо выполнить ряд общих и частных (для различных случаев измерений) требований.

Так, импульсные линии к сужающему устройству при измерении расхода жидкостей в горизонтальном трубопроводе присоединяют в нижней части поперечного сечения трубопровода (ниже его горизонтальной оси); при измерении расхода пара — на горизонтальном диаметре поперечного сечения трубопровода; при измерении расхода газа — в верхней части сечения трубопровода (выше его горизонтальной оси).

Дифманометр устанавливают по возможности ближе к сужающему устройству. Длина соединительных трубок при этом для достаточного сглаживания пульсаций давления должна быть не менее 3 м. Диаметр трубок выбирают из условий минимального динамического запаздывания по-

казаний дифманометра, обычно он равен 10–12 мм. Соединительные трубки монтируют или вертикально, или с уклоном 1:20 до 1:10. Монтаж соединительных трубок должен обеспечить возможность их периодической очистки, для чего используют фланцевые или ниппельные соединения.

При измерении расхода жидкости или пара дифманометр целесообразнее устанавливать ниже сужающего устройства, чтобы предотвратить попадание в него пузырьков воздуха. Если же по каким-либо причинам дифманометр монтируют выше сужающего устройства, то в соединительных линиях устанавливают газосборники с кранами для выпуска воздуха. В соединительных линиях (в наиболее низко расположенных точках) устанавливают также сосуды с кранами для слива отстоявшейся грязи и взвешенных частиц.

При измерении расхода пара необходимо обеспечить одинаковый уровень конденсата в соединительных трубках. Для этого вблизи сужающего устройства устанавливают уравнительные сосуды на такой высоте, чтобы конденсат мог накапливаться в них лишь до определенного уровня, а превысив его, стекал бы обратно в трубопровод. Тем самым устраняют ошибку в показаниях дифманометра за счет разностей уровней конденсата в соединительных линиях.

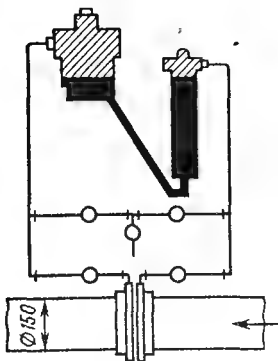


Рис. 63. Схема к контрольному вопросу

При измерении расхода газа дифманометр следует располагать выше сужающего устройства для того, чтобы содержащаяся в газе влага не попадала в дифманометр. Если же его можно монтировать только ниже сужающего устройства, то в наиболее низко расположенных точках соединительных линий устанавливают дренажные устройства.

Качественное техническое и метрологическое состояние расходомеров обеспечивается комплексом мероприятий по их обслуживанию, регламентируемым соответствующими инструкциями и правилами.

### Контрольный вопрос № 11

Проектировщиками был разработан оптимальный процесс измерения расхода на технологической линии.

Глядя на рис. 63, ответьте, какое сужающее устройство (сопло или диафрагму) было решено установить в трубопроводе?

Если Вы решите, что сопло, загляните на с. 154, если – диафрагму, то см. с. 155.

## 7.2. Расходомеры постоянного перепада давления

Общая характеристика расходомеров постоянного перепада давления. Расходомеры данного типа довольно широко применяются в систе-

мах автоматического регулирования в химической и топливной промышленности из-за конструктивной простоты; высокой чувствительности и вследствие этого возможности применения для измерения весьма малых расходов; возможности применения для измерения расхода агрессивных жидкостей и газов; простоты автоматизации измерений; постоянства относительной погрешности и вследствие этого значительно диапазона измерения  $Q_{\max}/Q_{\min} = 10:1$  (для расходомеров переменного перепада он составляет 3:1); незначительных потерь давления.

Однако эти приборы имеют и существенные недостатки, препятствующие их массовому применению: отсутствие научных принципов взаимозаменяемости и косвенной расчетной градуировки; необходимость индивидуальной градуировки на реальных измеряемых средах и существенные потери точности при измерении других сред, отличных от тех, на которых осуществлялась градуировка; непригодность для измерения больших расходов.

В настоящее время разработано и предложено несколько способов пересчета результатов опытных градуировок расходомеров постоянного перепада давления, проводимых на воде или на воздухе, на реальные измеряемые среды. Однако ни один из них не является универсальным и достаточно достоверным. Подробнее некоторые из этих способов будут рассмотрены ниже.

Существуют расходомеры постоянного перепада давления трех конструктивных разновидностей: ротаметры, поршневые и поплавковые расходомеры. Принцип действия всех этих приборов основан на силовом взаимодействии потока и помещенного в него тела.

**Ротаметры.** Основными элементами ротаметра (рис. 64), принципиально необходимыми для его работы, являются расширяющаяся кверху (по ходу вертикального потока) коническая трубка 1 и заключенный в нее поплавок 2. Для визуального отсчета показаний применяют стеклянную трубку, непосредственно на которую нанесены деления шкалы прибора.

Поплавок состоит из нижней конической и средней цилиндрической части, заканчивающейся бортиком с косыми канавками. Назначение канавок — обеспечить устойчивое вращение поплавка при течении измеряемой среды, что необходимо для его центрирования относительно оси трубки.

При использовании ротаметров в системах автоматического регулирования или контроля необходимы дополнительные устройства, преобразующие ход поплавка в пропорциональный механический, электрический или пневматический сигналы.

Принцип действия ротаметров состоит в следующем. Гидродинамическое давление потока измеряемой среды воздействует на поплавок и вызывает его вертикальное перемещение. При этом (в связи с конусностью трубки) изменяется площадь проходного сечения прибора, образованного диаметром буртика поплавка и внутренней стенкой трубки.

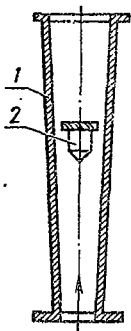


Рис. 64. Ротаметр



Это изменение площади происходит таким образом, что перепад давления по обе стороны поплавка остается практически постоянным (отсюда и название расходомеров).

Поплавок будет подниматься до тех пор, пока его вес и вес связанных с ним элементов не уравновесит уменьшающееся (вследствие уменьшения скорости из-за увеличения проходного сечения) по мере подъема поплавка динамическое давление потока.

Следовательно, условие равновесия поплавка будет иметь вид

$$V_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho) g = c_{\Pi} \rho \frac{v^2}{2} f_{\Pi}, \quad (7.11)$$

где  $V_{\Pi}$  — объем поплавка;  $\rho_{\Pi}$  — плотность материала поплавка;  $\rho$  — плотность измеряемой среды;  $c_{\Pi}$  — коэффициент сопротивления поплавка, зависящий в общем случае от числа Рейнольдса, шероховатости, формы, геометрических размеров и высоты подъема поплавка;  $f_{\Pi}$  — наибольшее поперечное (миделево) сечение поплавка;  $v$  — средняя скорость потока в кольцевом сечении, ограниченном с внутренней стороны  $f_{\Pi}$  и с внешней площадью сечения трубки  $F_T$ , соответствующей подъему поплавка.

Так как расход для рассматриваемого случая  $Q = v(F_T - f_{\Pi})$ , из уравнения (7.11) получим

$$Q = a_p (F_T - f_{\Pi}) \sqrt{\frac{2gV_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)}{\rho f_{\Pi}}}, \quad (7.12)$$

где  $a_p = 1/\sqrt{c_{\Pi}}$  — коэффициент расхода ротаметров, а в общем случае коэффициент расхода расходомеров постоянного перепада давления.

Уравнение (7.12) является общим уравнением измерений для всех расходомеров постоянного перепада.

Как следует из вышеизложенного, коэффициент расхода  $a_p$  зависит от большого числа факторов и непостоянен по шкале прибора. Эти обстоятельства и приводят к ряду теоретических и практических трудностей при пересчетах результатов градуировок ротаметров на условия, отличные от условий градуировки.

Для конической трубки площадь  $F_T$  задается соотношением

$$F_T = \frac{\pi}{4} (D_0 + 2H \operatorname{tg} \frac{\delta}{2})^2 = \frac{\pi}{4} (D_0^2 + 4HD_0 \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} + 4H^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\delta}{2}), \quad (7.13)$$

где  $D_0$  — внутренний диаметр трубки на нулевом делении;  $H$  — высота подъема поплавка относительно нулевого деления;  $\delta$  — центральный угол конической трубки.

Если центральный угол  $\delta$  мал (обычно  $\delta = 35'$ ), то квадратическим членом в правой части формулы (7.13) можно пренебречь. В этом случае уравнение измерений для ротаметров (связь между ходом поплавка и расходом) на основе формул (7.12) и (7.13) будет иметь вид

$$H = A Q - B, \quad (7.14)$$

$$\text{где } A = \frac{1}{4\alpha_p \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} \sqrt{2g \frac{V_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)}{\rho f_{\Pi}}}};$$

$$B = \frac{D_0^2}{4 \operatorname{tg} \frac{\delta}{2}}.$$

Как видно из уравнения (7.14), при малых  $\delta$  между ходом поплавка и расходом существует приближенная линейная пропорциональность, что также является достоинством расходомеров постоянного перепада давления.

**Основы пересчета градуировок ротаметров.** Наиболее общим подходом к пересчету градуировок ротаметров является установление некоторых универсальных зависимостей, определяющих  $\alpha_p$  и ход поплавка для геометрически подобных ротаметров со стандартизованными формой и размерами их элементов — поплавка и трубки. При высоком уровне стандартизации, обеспечивающем полное геометрическое подобие и взаимозаменяемость элементов, и достаточной достоверности полученных зависимостей их можно было бы использовать для косвенной (расчетной) градуировки ротаметров (аналогично расчету сужающих устройств по стандартизованным значениям их коэффициентов расхода). При отсутствии обоснованных норм, обеспечивающих точное технологическое копирование элементов ротаметров, каждый ротаметр градуируют индивидуально. Причем, из-за отсутствия специальных установок градуировку, как правило, проводят на типовых контрольных веществах (при измерении расхода жидкостей — на воде, при измерении расхода газов — на воздухе). Поэтому применение ротаметров как приборов с нормированной точностью для измерения расхода реальных сред, свойства которых отличны от свойств типовых контрольных веществ, требует создания достоверных способов пересчета градуировочных данных.

Рассмотрим один из наиболее общих способов пересчета, разработанный во ВНИИМС под руководством А.И. Петрова.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований ротаметров было установлено, что ход поплавка  $H$ , выраженный в долях диаметра поплавка  $d$ , зависит от двух безразмерных величин: числа Рейнольдса и величины  $\nu^2 \rho / G$ , где  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости измеряемой среды;  $\rho$  — ее плотность и  $G$  — кажущийся (с учетом выталкивающей силы) вес поплавка. Между этими величинами существует зависимость вида

$$\frac{H}{d} = k \operatorname{Re}^{n_1} \left( \frac{\nu^2 \rho}{G} \right)^{n_2}, \quad (7.15)$$

где коэффициент  $k$  и показатели степени  $n_1, n_2$  — постоянные величины для геометрически подобных ротаметров с одинаковой формой поплавка и трубки.

Эти коэффициенты для каждого типа ротаметра могут быть экспериментально определены. В этом случае при помощи специальных таблиц

или градуировочных створивых показавия ротаметра  $H$  на одной измеряемой среде могут быть пересчитаны на любую другую измеряемую среду (с другой вязкостью и плотностью). Естественно, это требует строгой взаимозаменяемости и геометрического подобия трубок и поплавков ротаметров, а также большой экспериментальной работы по определению опытных коэффициентов. Такие работы в настоящее время проводятся в метрологических институтах Госстандарта СССР.

Кроме того, в ряде отечественных и зарубежных расходомерных центрах ведутся экспериментальные исследования по нахождению такой формы поплавка (дисковой, тарельчатой, катушечной), при которой влияние вязкости и плотности измеряемой среды на показания ротаметров можно свести к минимуму.

Полученная на основе теории подобия зависимость (7.15) позволяет осуществить и достаточно простой „технологический” метод градуировки ротаметров, заключающийся в изменении веса поплавка таким образом, чтобы значение критерия  $\nu^2 \rho / G$  оставалось постоянным, т. е. в случае необходимости измерения расхода жидкости или газа, вязкость и плотность которых отличаются от вязкости и плотности градуировочной среды, необходимо и достаточно лишь изготовить новый поплавок весом  $G_2 = \nu_2^2 / \nu_1^2 \cdot \rho_2 / \rho_1 G_1$ , где  $G_1$  — вес поплавка ротаметра, градуированного на среде с вязкостью  $\nu_1$  и плотностью  $\rho_1$ .

Если форма и размеры нового поплавка полностью соответствуют старому, то новые значения шкалы прибора  $Q_2$  (соответствующие тому же ходу поплавка  $H$ ) подсчитывают, исходя из равенства чисел Рейнольдса по формуле  $Q_2 = Q_1 \cdot \nu_2 / \nu_1$ .

Этот метод очень простой, так как не требует построения экспериментальных пересчетных таблиц и графиков и пригоден для ротаметров любых размеров и любой формы поплавка.

К недостаткам метода можно отнести сложность точного технологического копирования поплавков и невозможность существенного варьирования их веса в случае, когда вязкости  $\nu_2$  и  $\nu_1$  значительно отличаются друг от друга.

Одним из перспективных путей расширения областей применения ротаметров для измерений расхода различных сред с гарантированной точностью является создание условий автомодельности их коэффициентов расхода  $\alpha_p$ , т. е. условий, при которых  $\alpha_p$  принимает постоянное значение и перестает зависеть от изменений вязкости и плотности измеряемых сред.

Как показали исследования, автомодельность  $\alpha_p$  для ротаметров с поплавками, имеющими в верхней части тонкий цилиндрический диск, наступает при числах Рейнольдса, характерных для течения среды в зазоре между трубкой и поплавком, больших 500.

Таким образом, если и при градуировке, и при работе ротаметра на реальной измеряемой среде обеспечивается соотношение

$$\text{Re}_{\text{зmin}} = \frac{Q_{\text{min}}(D_m - d)}{\frac{\pi}{4} (D_m^2 - d^2) 2\nu} \approx 0,7 \frac{Q_{\text{min}}}{(D_m + d) \nu} > 500, \quad (7.16)$$

где  $Q_{\min}$  — нижний предел измерений ротаметра;  $D_m$  — диаметр трубки на отметке шкалы ротаметра, соответствующей  $Q_{\min}$ , то на основании выражения (7.14) реальная функция преобразования ротаметра (градуировочная характеристика на реальной измеряемой среде) будет отличаться от его исходной градуировочной характеристики  $H = AQ - B$  постоянным множителем

$$b = \frac{1 - \frac{A}{B} \sqrt{\rho_{\Pi}/\rho_2 - 1}}{1 - \frac{A}{B} \sqrt{\rho_{\Pi}/\rho_1 - 1}} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{\Pi}/\rho_1 - 1}}{\sqrt{\rho_{\Pi}/\rho_2 - 1}}.$$

Это значит, что каждое новое (пересчитанное) показание ротаметра  $H_{pi}$ , соответствующее расходу  $Q_i$ , будет  $H_{pi} = bH_{Ti}$  где  $H_{Ti}$  — показание ротаметра, соответствующее расходу  $Q_i$  в условиях градуировки.

Сам метод прост, но для его осуществления необходим выбор таких конструктивных параметров поплавка, которые в достаточно широком диапазоне изменения вязкости обеспечат соотношение (7.16).

Рассмотренные примеры показывают, что и те, кто сейчас еще только осваивает по этому учебнику азы расходомерии, будут иметь широкие возможности для творческих поисков повышения точности даже таких, казалось бы, простейших и хорошо изученных средств измерения расхода, как ротаметры.

**Поршневые и поплавковые расходомеры.** Поршневые расходомеры применяются для измерения расхода воды, нефтепродуктов, вязких и агрессивных жидкостей. Устройство поршневого расходомера показано на рис. 65. В корпусе прибора 1 запрессована цилиндрическая бронзовая втулка 2, имеющая круглое входное отверстие и прямоугольное выходное. Внутри втулки под действием динамического давления потока измеряемой среды перемещается поршень 3 с грузами 8, открывая или перекрывая выходное отверстие. Положение поршня, являющееся мерой расхода вещества, передается с помощью штока 7 и фиксируется индукционной системой 4, 5, 6.

Конструктивно корпус, втулка и поршень выполняются таким образом, что в крайнем нижнем положении поршня выходное отверстие остается полностью открытым, а входное полностью закрытым.

Предел измерений прибора регулируется изменением ширины выходного отверстия.

Если у измеряемого вещества высокая температура, крышка прибора снабжается ребристым охладителем, если низкая температура и большая вязкость, то крышка обогревается паром или горячей водой.

Поршневой расходомер следует устанавливать на горизонтальном участке трубопровода длиной не менее  $10D$  до прибора и не менее  $8D$  после прибора. В случае измерения расхода загрязненных жидкостей перед прибором монтируют фильтр.

Принцип действия поплавковых расходомеров (рис. 66) аналогичен принципу действия ротаметров и поршневых расходомеров. В данном

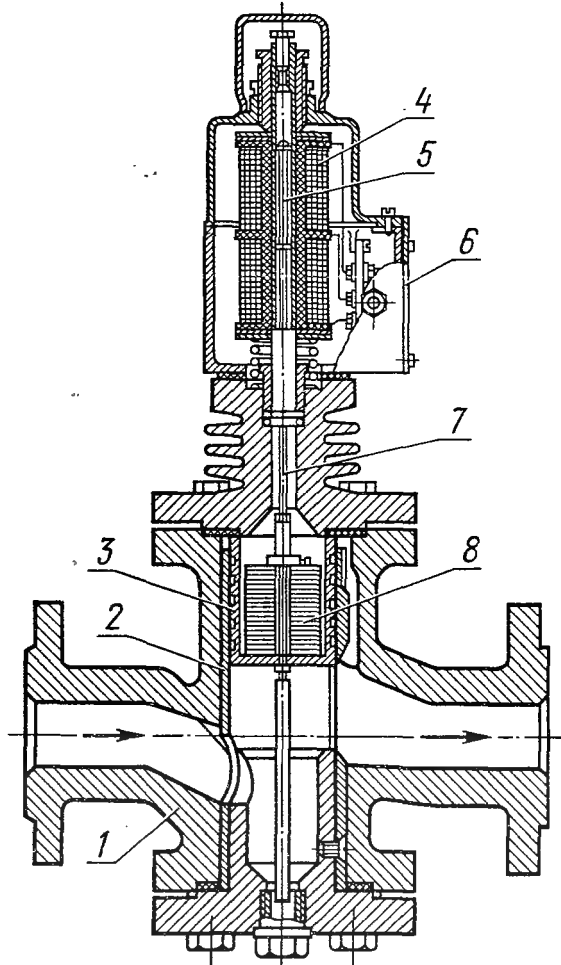


Рис. 65. Поршневой расходомер

случае динамическое давление потока измеряемой среды воздействует на поплавок, занимающий в зависимости от величины расхода определенное положение относительно седла, находящегося в корпусе вентильного типа.

Основные недостатки ротаметров (необходимость индивидуальной градуировки и существенное влияние свойств измеряемых сред на точность измерений) сохраняются и у этих расходомеров.

**Метрологические характеристики и область применения расходомеров постоянного перепада давления.** В настоящее время нормируются погрешности лишь тех расходомеров постоянного перепада, которые были индивидуально градуированы на реальной измеряемой среде. В этом случае при постоянных (и не отличающихся от условий градуировки) усло-

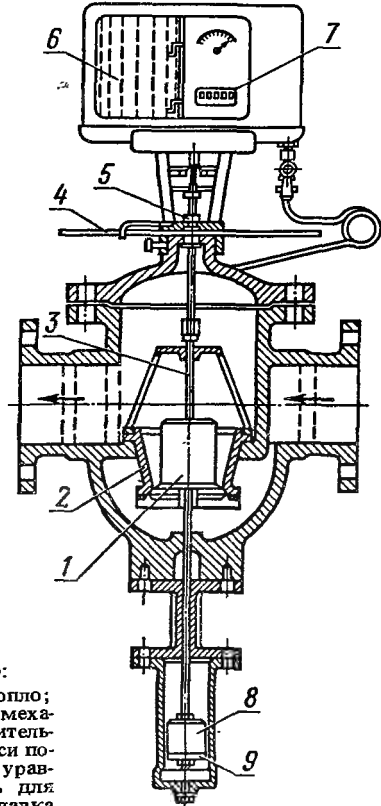


Рис. 66. Поплавковый расходомер:

1 — поплавок; 2 — измерительное сопло;  
3 — шток; 4 — диск, предохраняющий механизм от нагрева; 5 — втулка с уплотнительной набивкой; 6 — диафрагма для записи показаний; 7 — счетный указатель; 8 — уравновешивающий груз; 9 — поршень для обеспечения плавного движения поплавка

виях измерений погрешность приборов будет определяться погрешностями их градуировки ( $\delta_{гр}$ ), отсчета показаний ( $\delta_H$ ) и нелинейности шкалы ( $\delta_{нел}$ ).

Существующие установки для градуировки промышленных ротаметров позволяют градуировать их с погрешностью, не превосходящей 0,2–0,3 %. Следовательно, среднее квадратическое значение погрешности градуировки (при равновероятном ее распределении в пределах допусков) может оцениваться величиной  $\sigma_{гр} = \sigma_{гр}/\sqrt{3} = 0,18 \%$ .

Среднее квадратическое значение погрешности  $\delta_H$  определяется ошибкой отсчета, равной половине деления шкалы (при визуальном отсчете, например, у стеклянных ротаметров), и у применяемых приборов данного типа достигает 1,5–2,0 % (при  $Q = 0,1Q_{min}$ ).

Погрешность вследствие нелинейности шкалы  $\delta_{нел}$  связана, в основном, с непостоянством коэффициента расхода  $\alpha_p$  при изменении положения поплавка и связанных с этим изменений структуры потока. Обычно среднее квадратическое значение этой погрешности  $\delta_{нел}$  по аналогии с сужающими устройствами принимают равным 0,5–0,6 %.

Вы правы. Как следует из схемы соединительных линий в случае, показанном на рис. 38, измеряется расход газа. Поэтому при диаметре трубопровода, меньшем 300 мм, по причинам, указанным в разд. 7.1, целесообразнее применять нормальное сопло.

Если Вы рассуждали аналогичным образом, то в материале учебника, относящемся в расходомерам переменного перепада давления, Вы разобрались достаточно хорошо.

Просуммировав все составляющие, получим наибольшую по шкале (при  $Q = 0,1Q_{\max}$ ) относительную среднюю квадратическую погрешность расходомеров постоянного перепада давления

$$\sigma_p = \sqrt{\delta_{гр}^2 + \delta_H^2 + \sigma_{нел}^2} = 1,6 - 2,2 \, \%.$$

Максимальная (с доверительной вероятностью  $P = 0,9973$ ) приведенная к верхнему пределу измерений расхода погрешность данного типа расходомеров составит  $\delta_{пр} = 3/10 \cdot \sigma_p = 0,5 - 0,7 \, \%$ .

При колебаниях плотности измеряемой среды, характеризующимся средним квадратическим значением  $\sigma_p$ , к рассмотренным выше составляющим добавляется дополнительная погрешность вследствие колебаний плотности среды, равная на основании формулы (7.14)

$$\delta_\rho = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\rho_{п}}{\rho_{п} - \rho} \cdot \sigma_\rho.$$

Таким образом, при индивидуальной градуировке, проведенной на реальной измеряемой среде, расходомеры постоянного перепада давления могут применяться как приборы с нормированной точностью для измерения расхода жидкостей, газов или пара. При этом, в случае измерения однофазных чистых сред с незначительными изменениями их вязкости и плотности точность измерения расхода данными приборами выше, чем точность измерения расходомерами переменного перепада давления. Нормальные (не влияющие на точность) условия их эксплуатации определяются лишь наличием достаточно длинных вертикальных (для ротаметров) или горизонтальных (для поршневых и поплавковых расходомеров) участков трубопровода.

Без индивидуальной градуировки или при градуировке на средах, отличных от измеряемой, расходомеры постоянного перепада в настоящее время (до разработки и внедрения правил пересчета результатов градуировок) можно применять лишь как устройства индикаторного типа, качественно характеризующие изменения расхода (больше — меньше, есть расход — нет расхода). Устройства такого типа используют в системах автоматического регулирования и контроля за ходом различных технологических процессов в химической, газовой, топливной промышленности и др. Простота, хорошие динамические характеристики (постоянная времени 0,5–1 с), устойчивость к агрессивным средам — эти свойства ротаметров способствовали их наибольшему распространению в упомянутых системах.

В настоящее время серийно выпускают ротаметры показывающие со стеклянной трубкой типа РС, ротаметры с электрической дистанцион-

ной передачей типа РЭ и ротаметры с пневматической дистанционной передачей типа РП.

### Контрольный вопрос № 12

Определите знак дополнительной ошибки, вызванной термическим расширением поплавка ротаметра.

Если Вы решите, что ошибка положительна, загляните на с. 157; если отрицательна, обратитесь к с. 159.

### К контрольному вопросу № 11

Вы неправильно ответили на вопрос, поэтому Вам необходимо заново повторить разд. 7.1.

## 7.3. Турбинные расходомеры

**Общие характеристики.** Турбинные (или как их часто называют тахометрические) расходомеры являются наиболее точными приборами для измерения расхода жидкостей. Приведенная погрешность измерения расхода турборасходомерами составляет значение порядка 0,5—1,0 % (известны турборасходомеры с приведенной погрешностью 0,1—0,2 %).

Приборы просты по конструкции, имеют большую чувствительность и большие пределы измерений (для одной модификации 10:1 и более), возможность измерения как малых (от  $5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ ), так и достаточно больших (до  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ ) расходов жидкостей с широким диапазоном физико-химических свойств, малую инерционность и вследствие этого относительно малые динамические погрешности при измерении средних и мгновенных значений расходов. Их, в основном, применяют там, где требования к точности измерений превалируют, например, в ракетной и авиационной технике.

К недостаткам турбинных расходомеров существующих модификаций, препятствующим более широкому применению данных приборов, можно отнести: необходимость индивидуальной градуировки и вследствие этого необходимость наличия градуировочных установок высокой точности; влияние изменения вязкости измеряемой среды и гидродинамических параметров потока на показания приборов; наличие изнашивающихся опор, что резко сокращает срок службы приборов (особенно при измерении расхода абразивных сред), снижает их точность в процессе эксплуатации и приводит к необходимости их частых переградуировок (уточнения значений меняющихся в процессе эксплуатации градуировочных коэффициентов).

В настоящее время отечественным приборостроением разработаны и осваиваются безопорные турбинные расходомеры, турбинные расходомеры с устройствами автоматической коррекции показаний при изменении вязкости измеряемой среды, у которых два последних недостатка отсутствуют.

**Принцип действия. Уравнение измерений.** Для осуществления процесса измерений турбинный расходомер (рис. 67) должен состоять, по крайней мере, из трех элементов; турбинного первичного преобразова-



теля 3; вторичного преобразователя 4; отсчетной системы (регистратора) 1. Турбинный преобразователь представляет собой аксиальную или тангенциальную лопастную турбинку (на рис. 67 показана аксиальная турбинка), опирающуюся на крнковые подпятники или подшипники 2.

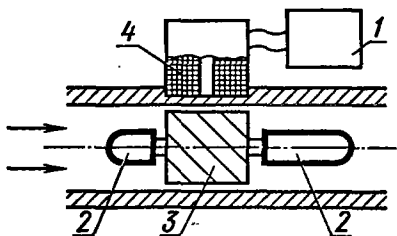


Рис. 67. Принципиальная схема турбинного расходомера

Поток измеряемой среды, воздействуя на наклонные лопасти турбинки, сообщает ей вращательное движение с угловой скоростью  $\omega$ , пропорциональной расходу  $Q$ .

Вторичный преобразователь, изображенный на схеме, представляет собой индукционную катушку. При пересечении магнитного поля катушки лопастями ферромагнитной турбинки в катушке наводится пикообразный пульсирующий ток. Частота пульсаций наведенного тока пропорциональна угловой скорости вращения турбинки, а следовательно, и измеряемому расходу. В качестве вторичных преобразователей используются также индуктивные катушки, в которых при вращении ферромагнит-

ной турбинки создается периодическое изменение индуктивности, вызывающее соответствующие изменения одного из параметров текущего через нее тока. Применяются также и фотоэлектрические элементы.

Импульсы пульсирующего тока регистрируются отсчетной системой. Общее число импульсов, зарегистрированных этой системой за время  $t$ , характеризует суммарное количество вещества, протекающее по трубопроводу за это время. Число импульсов, зарегистрированных (отсчитанных) системой за единицу времени, характеризует расход измеряемого вещества.

Уравнение равномерного вращения лопастной турбинки имеет вид

$$M_{дв} = \Sigma M_{ci}, \quad (7.17)$$

где  $M_{дв}$  — движущий момент на роторе турбинки, сообщаемый ей потоком измеряемой среды;  $\Sigma M_{ci}$  — сумма моментов сопротивления.

На основе известного уравнения Эйлера (на котором базируются все расчеты турбинных двигателей) для осевого входа потока движущий момент

$$M_{дв} = a\rho Q^2 - b\rho Q\omega, \quad (7.18)$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами турбинного датчика (радиусом лопастей  $R$ , радиусом ступицы турбинки  $r$ , углом наклона лопастей  $\alpha$ ) и зависящие от числа Рейнольдса в области неавтомоделного потока.

Если предположить, что на турбинный датчик не действует никаких моментов, препятствующих его вращению, т. е. что  $\sum M_{\vec{n}} = 0$ , то на основании формулы (7.18) зависимость между угловой скоростью вращения датчика  $\omega$  и расходом  $Q$  определялась бы уравнением

$$\omega = AQ, \quad (7.19)$$

где  $A = a/b$ .

В действительности же на турбинку действуют моменты сил гидравлического трения жидкости, момент сил трения в опорах и ряд других. Действие этих моментов будет характеризоваться так называемой зоной нечувствительности прибора, т. е. тем наименьшим расходом ( $Q_0$ ), который необходим для того, чтобы преодолеть моменты сопротивления и сдвинуть турбинку с места или изменить ее установившуюся скорость вращения.

С учетом сказанного из формулы (7.19) получим рабочее уравнение турбинных расходомеров

$$\omega = A(Q - Q_0). \quad (7.20)$$

Так как коэффициент  $A$  и величина  $Q_0$  определяются в процессе непосредственной градуировки, то уравнение (7.20), решенное относительно  $Q$ , называют иногда градуировочной зависимостью турбинных расходомеров.

Как следует из этого уравнения, область постоянной линейной зависимости угловой скорости вращения турбинки от расхода определяется зоной постоянства коэффициента  $A$  и величины  $Q_0$ , которые в общем случае кроме конструктивных параметров прибора зависят также от числа Рейнольдса, структуры потока (его искажений и „закрутки“), расхода и вязкости измеряемой среды.

Значение  $Q_0$  при правильном проектировании и изготовлении турбинных датчиков (малый коэффициент трения в опорах, отсутствие лерекосов, хорошая балансировка турбинки, защищенность от осевых нагрузок) может быть сведено к ничтожно малому, что и обеспечивает высокую чувствительность и большой диапазон измерений турбинных расходомеров.

Метрологические характеристики и область применения турбинных расходомеров. Основными составляющими погрешности турбинных расходомеров при нормальных (не отличающихся от условий градуировки) условиях их эксплуатации являются:

#### К контрольному вопросу № 12

Вы правильно ответили на вопрос.

Действительно, увеличение диаметра поплавка при том же расходе через ротаметр приводит к увеличению силы, действующей на поплавок со стороны потока, а следовательно, и к большему его подъему относительно нулевого деления шкалы.

погрешность градуировки прибора на образцовой расходомерной установке  $\delta_{гр}$ , т. е. погрешность определения градуировочных значений  $A$  и  $Q_0$ ;

погрешность  $\delta_N$  (или регистрации) количества импульсов, соответствующих угловой скорости вращения турбинки  $\delta_N$ ;

погрешность  $\delta_t$  регистрации времени счета импульсов  $t$ .

Погрешность  $\delta_N = \Delta N / N_{\min}$ , где  $\Delta N$  — ошибка счета импульсов, обычно равная  $\pm 1$  импульс,  $N_{\min}$  — суммарное число импульсов, поданное на счетную систему при минимальном расходе за время  $t$ .

Увеличивая  $N_{\min}$  за счет увеличения  $t$ , угла наклона лопастей  $\alpha$ , числа лопастей  $z$  турбинки или заполняя импульсные паузы высокочастотными модулированными сигналами, можно свести погрешность  $\delta_N$  практически к любому сколь угодно малому значению.

Погрешность  $\delta_t$  высокоточных электронных частотомеров, применяемых для счета импульсов, составляет в худшем случае (при  $t = 1$  с)  $10^{-3} - 10^{-4} \%$ .

Таким образом, погрешность измерения расхода турбинными расходомерами при нормальных условиях эксплуатации и в случае применения высокоточных отсчетных систем для регистрации  $N$  и  $t$  практически целиком определяется погрешностями их градуировок.

Основными эксплуатационными факторами, существенно влияющими на точность измерения расхода турбинными расходомерами, являются: изменение вязкости измеряемой среды; закрутка потока и неравномерность распределения скоростей, вызванные наличием близко расположенных местных сопротивлений и износ опор.

Вследствие этого данные приборы мало пригодны для измерения расхода загрязненных или абразивных сред, а также жидкостей, сильно меняющих свою вязкость в условиях эксплуатации приборов.

Если не принять соответствующих мер для частичной или полной компенсации влияния указанных факторов, то дополнительные погрешности, например, вследствие изменения кинематического коэффициента вязкости измеряемой среды всего лишь на 10 % могут достигать 3 % и более, а из-за близкой установки 90-градусного колена трубопровода — 2–5 %.

Для снижения влияния вязкости применяют различного рода устройства (сетки, спицы, конфузоры), устанавливаемые перед турбинкой и искусственно турбулизирующие поток.

Влияние местных сопротивлений, закручивающих поток, в значительной мере устраняется, если перед турбинным датчиком установлены специальные направляющие или сопловые аппараты. В этом случае для нормальной работы турбинных датчиков не требуется столь длинных прямых участков трубопровода, как для других типов расходомеров.

Для измерения расхода газов сравнительно редко применяют турбинные расходомеры. Это объясняется тем, что движущий момент на роторе турбинки в газовых потоках вследствие их малой плотности получается значительно меньшим, чем в жидкостных, в результате чего уменьшается чувствительность прибора и диапазон измерений. Кроме того, большие скорости газовых потоков ускоряют износ опор.

Турбинные расходомеры обладают достаточно хорошими динамическими характеристиками (постоянной времени 0,001 с), поэтому их мож-

но применять для измерения мгновенных значений расхода в пульсирующих потоках.

### Контрольный вопрос № 13

Две совершенно идентичные турбинки установлены непосредственно друг за другом.

Какая из турбинок будет вращаться с большей угловой скоростью вращения при одном и том же расходе — первая (по ходу потока) или вторая?

Если Вы решите, что первая — см. с. 168; если вторая — см. с. 174.

### К контрольному вопросу № 12

Вы не поняли физический принцип работы расходомеров постоянного перепада давления.

Повторите заново разд. 7.2 и уясните себе, каким образом и за счет чего поднимается поплавков ротаметра?

К тахометрическим расходомерам, кроме турбинных, относятся и шариковые расходомеры, получившие достаточно широкое распространение для измерения расхода агрессивных сред и сред, содержащих абразивные включения, т. е. там, где трудно обеспечить надежную работу опор турбинных датчиков.

Подвижным элементом шариковых расходомеров является шарик, непрерывно движущийся в одной плоскости по внутренней поверхности трубы под воздействием предварительно закрученного винтовым направляющим аппаратом потока жидкости. От перемещения вдоль оси трубы шарик удерживается ограничительным кольцом. Неподвижные лопасти служат для „выпрямления” потока на выходе из преобразователя. Для преобразования скорости вращения шарика в частоту импульсов тока служит индукционное или индуктивное устройство. Шар под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности трубы, а под действием осевой составляющей скорости потока — к ограничительному кольцу. Поэтому шару помимо сил вязкостного трения жидкости приходится преодолевать силы трения о поверхность трубы и ограничительного кольца. Это вызывает отставание окружной скорости шара  $v_{ш}$  от соответствующей окружной скорости потока  $v$ . Это отставание характеризуется скольжением  $S_{ск}$ , равным  $S_{ск} = (v - v_{ш})/v$ . Откуда,  $v_{ш} = v(1 - S_{ск})$ ; Как следует из этого соотношения, пропорциональность между угловой скоростью вращения шара и скоростью потока измеряемой среды обеспечивается при постоянстве скольжения  $S_{ск}$ , которое зависит, в основном, от лобового сопротивления шара. Следовательно, шариковые расходомеры целесообразно использовать там, где коэффициент лобового сопротивления шара  $C$  остается (в приемлемых пределах) постоянным, т. е. в автомоделной для  $C$  по числу Рейнольдса зоне, которая обычно принимается равной  $10^3 < Re < 10^5$ .

## 7.4. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия. Уравнение измерений. В проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля, индуцируется ЭДС, пропорцио-

нальная скорости движения проводника. При этом направление тока, возникающего в проводнике, перпендикулярно к направлению движения проводника и направлению магнитного поля.

Это известный закон электромагнитной индукции — закон Фарадея.

Если заменить проводник потоком проводящей жидкости, текущей между полюсами магнита, и измерять ЭДС, наведенную в жидкости по закону Фарадея, можно получить принципиальную схему электромагнитного расходомера (рис. 68), предложенную еще самим Фарадеем.

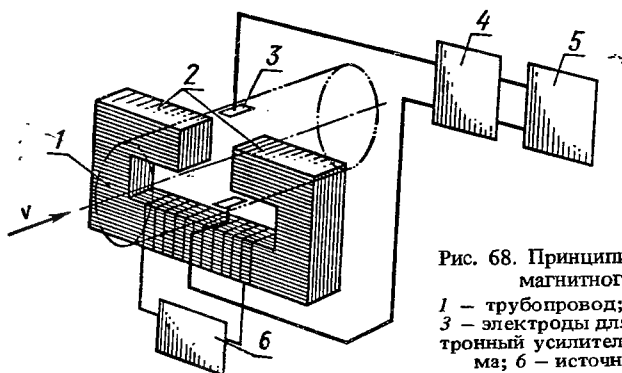


Рис. 68. Принципиальная схема электромагнитного расходомера:

1 — трубопровод; 2 — полюса магнита; 3 — электроды для съема ЭДС; 4 — электронный усилитель; 5 — отсчетная система; 6 — источник питания магнита

Индуктируемую разность потенциалов  $E$  на электродах 3 определяют по уравнению электромагнитной индукции

$$E = -KBDv_{\text{ср}}, \quad (7.21)$$

где  $B$  — магнитная индукция в зазоре между полюсами магнита;  $v_{\text{ср}}$  — средняя скорость потока жидкости;  $D$  — внутренний диаметр трубопровода;  $K$  — коэффициент, зависящий от вида магнитного поля.

Для случая постоянного магнитного поля  $K = 1$ . Если же магнитное поле изменяется во времени  $t$  с частотой  $f$ , то  $K = \sin 2\pi ft$ .

Магнитное поле создается источником питания 6 магнита (см. рис. 68). ЭДС, снимаемую с электродов, при помощи электронного усилителя 4, преобразуют в усиленный электрический сигнал, регистрируемый отсчетной системой 5.

Выражая в уравнении (7.21) среднюю скорость потока через объемный расход измеряемой среды, получим уравнение измерений электромагнитных расходомеров:

для случая постоянного магнитного поля

$$E = -4 \frac{B}{\pi D} Q; \quad (7.22)$$

для случая переменного магнитного поля

$$E = -4 \frac{B \sin 2\pi ft}{\pi D} Q. \quad (7.23)$$

Таким образом, электромагнитные расходомеры могут быть выполнены как с постоянными, так и с электромагнитными, питаемыми переменным током частотой  $f$ . Эти электромагнитные расходомеры имеют свои достоинства и недостатки, определяющие области их применения.

**Метрологические характеристики и область применения электромагнитных расходомеров.** Погрешность данных приборов определяется в основном погрешностями их градуировки (определения постоянной величины  $C = 4KB/\pi D$ ) и измерения разности потенциалов  $E$ . Однако электрохимические процессы в потоке жидкости, различные помехи и наводки, непостоянство напряжения питания и другие, не позволяют пока получить той потенциально высокой точности измерений расхода, которая вытекает из принципа действия данного типа расходомеров. Так, изготавливаемые в СССР электромагнитные расходомеры, несмотря на индивидуальную градуировку, (на высокоточных расходомерных стендах) и весьма совершенные средства измерения  $E$  имеют класс точности 1,0–2,5 %.

Существенным и основным недостатком электромагнитных расходомеров с постоянным электромагнитом, ограничивающим их применение для измерения слабопульсирующих потоков, является поляризация измерительных электродов, при которой изменяется сопротивление преобразователя, а следовательно, появляются существенные дополнительные погрешности. Поляризацию уменьшают, применяя электроды из специальных материалов (угольные, каломелиевые) или специальные покрытия для электродов (платиновые, танталовые).

В расходомерах с переменным магнитным полем явление поляризации электродов отсутствует, однако появляются другие эффекты, также искажающие полезный сигнал.

Во-первых, это трансформаторный эффект, когда на витке, образуемом жидкостью, находящейся в трубопроводе, электродами, соединительными проводами и вторичными приборами наводится трансформаторная ЭДС, источником которой является первичная обмотка системы возбуждения магнитного поля. Трансформаторные помехи могут достигать 20–30 % полезного сигнала. Для их компенсации в измерительную схему прибора вводят специальные дополнительные устройства.

Во-вторых, имеет место емкостный эффект, возникающий из-за большой разности потенциалов между системой возбуждения магнитного поля и электродами и паразитной емкости между ними (соединительные провода и т. п.). Средством борьбы с этим эффектом является тщательная экранировка.

В-третьих, может иметь место эффект влияния изменения частоты питающего систему возбуждения магнитного поля тока. Компенсируют этот эффект установкой специальных стабилизирующих устройств, что усложняет измерительные схемы и уменьшает надежность приборов.

Тем не менее электромагнитные расходомеры широко применяют в металлургической, биохимической и пищевой промышленности, в строительстве и руднообогатительном производстве, в медицине, так как они малоинерционны по сравнению с расходомерами других типов. Расходо-

меры незаменимы в тех процессах автоматического регулирования, где запаздывание играет существенную роль, или при измерении быстро меняющихся расходов.

Первичные преобразователи электромагнитных расходомеров не имеют частей, выступающих внутрь трубопровода (электроды устанавливаются заподлицо со стенкой трубопровода), сужений или изменений профиля. Благодаря этому гидравлические потери на приборе минимальны. Кроме того, преобразователь расходомера и технологический трубопровод можно чистить и стерилизовать без демонтажа. Поэтому эти расходомеры используют в биохимической и пищевой промышленности, где доминирующими являются требования к стерильности измерений среды. Отсутствие полых углублений исключает застывание и коагулирование измеряемого продукта.

На показания электромагнитных расходомеров не влияют взвешенные в жидкости частицы и пузырьки газа, осесимметричное (а в каналах специальной формы любое) изменение профиля распределения скоростей потока, а также физико-химические свойства измеряемой жидкости (вязкость, плотность, температура и т. п.), если они не изменяют ее электропроводность.

Электромагнитные расходомеры можно монтировать в любом положении на расстояниях, равных не менее 20 диаметров трубопровода после местных сопротивлений, нарушающих осесимметричное течение среды, и не менее восьми диаметров до местных сопротивлений.

Конструкция первичных преобразователей позволяет применять новейшие изоляционные, антикоррозионные и другие покрытия, что дает возможность измерять расход агрессивных и абразивных сред.

Отмеченные преимущества и обеспечили достаточно широкое распространение электромагнитных расходомеров, несмотря на их относительную конструктивную сложность и необходимость тщательного ежедневного технического ухода (подрегулировка нуля, поднастройка и т. п.).

Электромагнитные расходомеры применяют для измерения очень малых ( $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ ) расходов (например, для измерения расхода крови по кровеносным сосудам) и больших расходов жидкостей ( $3 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Причем диапазон измерения расходомера одного типоразмера достигает значения 10:1, т. е. достаточно велик.

Электромагнитные расходомеры непригодны для измерения расхода газов, а также жидкостей с электропроводностью менее  $10^{-3} - 10^{-5} \text{ сим/м}$  ( $10^{-5} - 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ), например, легких нефтепродуктов, спиртов и т. п. Применение разрабатываемых в настоящее время специальных автокомпенсирующих устройств позволит существенно снизить требования к электропроводности измеряемых сред и создать электромагнитные расходомеры для измерения расхода любых жидкостей, в том числе и нефтепродуктов.

## 7.5. Ультразвуковые расходомеры

Принципиальная схема ультразвукового расходомера приведена на рис. 69. Звуковые колебания высокой частоты (20 кГц и выше), созда-

ваемые электроакустическим преобразователем (излучателем) *И1*, проходят через текущую по трубопроводу среду и регистрируются приемником

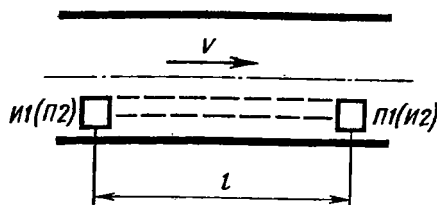


Рис. 69. Принципиальная схема ультразвукового расходомера

*П1*, отстоящим от излучателя на расстояние  $L$ . Если  $v$  — скорость потока среды, а  $c$  — скорость звука в данной среде, то продолжительность распространения звуковой волны по направлению движения потока от излучателя *И1* до приемника *П1*

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v} . \quad (7.24)$$

Продолжительность же распространения звуковой волны

против движения потока от излучателя *И2* до приемника *П2*

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v} . \quad (7.25)$$

Не трудно убедиться, что на основании формул (7.24) и (7.25) разность  $\tau_2 - \tau_1$ , измеряемая электронно-счетной схемой,

$$\Delta\tau = \frac{2Lv}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} . \quad (7.26)$$

Приняв во внимание, что  $v^2/c^2$  пренебрежимо мала по сравнению с единицей (например, для жидкостей, у которых  $c = 1000-1500$  м/с, а  $v$  не превосходит 6–8 м/с,  $v^2/c^2 < 6 \cdot 10^{-5}$ ), и выразив скорость потока через расход, получим уравнение измерений ультразвуковых расходомеров

$$\Delta\tau = 2\varphi \frac{L}{Fc^2} Q , \quad (7.27)$$

где  $F$  — площадь сечения потока;  $\varphi$  — коэффициент, учитывающий распределение скоростей по сечению потока.

Существуют различные способы и различные измерительные схемы для определения  $\Delta\tau$ :

- 1) измерение разности фазовых сдвигов ультразвуковых волн, направляемых по потоку и против него;
- 2) измерение разности частот повторения коротких импульсов или пакетов ультразвуковых колебаний, направляемых одновременно по потоку и против него;
- 3) измерение разности длительности прохождения коротких импульсов, направляемых одновременно по потоку и против него.

Кроме того, имеется самостоятельный метод определения расхода, основанный на измерениях смещения потоком ультразвуковой волны, направляемой перпендикулярно к направлению движения среды.



Основные трудности практического использования ультразвуковых расходомеров связаны с тем, что, во-первых, скорость распространения звука зависит от физико-химических свойств измеряемой среды (ее температуры, давления, концентрации и т. п.) и, во-вторых, она несоизмеримо больше скорости движения этой среды. Первое из отмеченных обстоятельств приводит к необходимости применения в ультразвуковых расходомерах специальных методов и средств компенсации влияний свойств среды, второй — к необходимости использования дифференциальных схем измерений (для выделения „слабого” полезного сигнала). И то, и другое обуславливает большую сложность измерительной аппаратуры.

Кроме того, показания ультразвуковых расходомеров зависят от числа Рейнольдса. Это объясняется тем, что они измеряют не действительную среднюю скорость потока, а среднюю скорость по линии ультразвукового луча. Соотношение между этими скоростями является функцией числа Рейнольдса.

Несмотря на это, ультразвуковые расходомеры все более широко применяют в нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности, при гидравлических исследованиях и испытаниях гидромашин. Достоинствами их являются:

- возможность бесконтактного измерения любых сред, в том числе и неэлектропроводных;

- достаточно высокая точность приборов при их индивидуальной градуировке и использовании специальных средств автокомпенсации наиболее существенных помех (известны ультразвуковые расходомеры, основная погрешность которых не превышает 0,3 % верхнего предела измерений);

- высокая надежность чувствительных элементов (излучателей и приемников ультразвуковых колебаний), представляющих собой круглые пластинки кварца или титаната бария, устанавливаемые снаружи трубопровода или защищенные от непосредственного контакта с измеряемой средой металлическим (пластмассовым) звукопроводом;

- высокое быстродействие, позволяющее измерять пульсирующие расходы с частотой пульсаций до 10 000 Гц.

Чувствительность ультразвуковых расходомеров зависит от отношения  $v/c$ . Чем больше это отношение, тем больше чувствительность прибора и тем меньше погрешности измерений. Из сказанного следует, что данные приборы более пригодны для измерения расхода газов, чем жидкостей, так как значение  $v/c$  у газов значительно больше. Однако в настоящее время ультразвуковые расходомеры преимущественно применяются для измерения расхода жидкостей. Это объясняется тем, что акустическое сопротивление ( $\rho c$ ) газов мало. Поэтому ультразвуковым колебаниям в газе трудно сообщить энергию, необходимую для переноса волны от излучателя до приемника, поскольку количество энергии, отбираемой средой от излучателя, пропорционально акустическому сопротивлению среды.

Кроме того, коэффицент поглощения звука для газов значительно больше, чем для жидкостей.

## 7.6. Оптические (лазерные) расходомеры

К числу сравнительно новых, но быстро развивающихся методов измерения локальных скоростей потока и расхода относятся методы, основанные на применении оптических квантовых генераторов—лазеров (ОКГ). Достоинствами этих методов являются: бесконтактность, высокая чувствительность, малая инерционность, большой диапазон измерений скоростей и расходов независимо от физических свойств измеряемой среды (как жидкостей, так и газов), за исключением требования ее прозрачности в диапазоне длин волн, излучаемых квантовыми генераторами.

Наиболее перспективно применение оптических методов в экспериментальной гидродинамике, особенно в области турбулентных явлений, изучение которых традиционными способами (например, с помощью термоанемометров) уже не дает желаемых результатов вследствие малой точности приборов и, главное, вносимых ими искажений в изучаемую структуру потока.

Кроме того, лазерные расходомеры используют при измерении расхода агрессивных, высоко- и низкотемпературных (криогенных) жидкостей и газов.

В настоящее время распространение получили две конструктивные разновидности оптических (лазерных) расходомеров, отличающихся лежащими в их основе физическими явлениями: расходомеры, основанные на эффекте рассеяния света движущимися частицами (доплеровские расходомеры), и расходомеры, основанные на эффекте Физо-Френеля — увлечения света движущейся средой.

В оптическом расходомере (назовем его сокращенно ДИС), реализующем первый эффект, излучение лазера, рассеянное движущимися в потоке естественными или искусственно введенными частицами, приобретает частотный сдвиг, пропорциональный осредненной скорости частиц.

Принципиальная схема ДИС показана на рис. 70. Прибор работает следующим образом. Световой поток, излучаемый газовым лазером 1, делится расщепителем 2 на два параллельных пучка равной интенсивности, которые линзой 3 фокусируются в исследуемой области среды, движущейся по трубопроводу 4. В области пересечения лучей возникает пространственная интерференционная картина из чередующихся светлых и темных полос. Перемещающиеся в этой области частицы перекрывают светлые полосы, в результате чего рассеянный частицами свет модулируется частотой, пропорциональной скорости движения частиц.

Рассеянный свет улавливается приемной оптической системой 5 и направляется на фотодетектор 7. Выделение и регистрация частотного сигнала (пропорционального скорости движения частиц) осуществляется анализатором спектра или автоматической следящей системой 8. Диафрагма 6 предохраняет фотодетектор от фонового излучения.

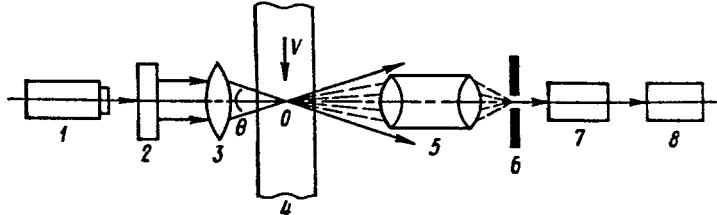


Рис. 70. Принципиальная схема лазерного измерителя скоростей

Для создания рассеивающих центров (зоны движущихся частиц) в жидкостях в настоящее время чаще всего используют полистироловые шарики диаметром 0,5–1,0 мкм, добавляемые в поток с объемной концентрацией 0,002–0,02 %. Для получения сигнала требуемой интенсивности в газах достаточно  $0,15 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> взвешенных примесей и аэрозоля. Эффективным способом получения рассеивающих центров в газах является способ распыления жидкостей (например, воды).

Основными источниками методических погрешностей ДИС являются: неравномерность профиля скоростей потока; турбулентные пульсации скоростей; неоднородность рассеивающих частиц и их „проскальзывание” (несовпадение скоростей) относительно основного потока.

Эти погрешности совместно с аппаратурными обуславливают суммарную погрешность измерений расхода с помощью ДИС порядка 1,5–2,0 %.

Принципиальная схема расходомера, реализующего эффект Физо-Френеля, показана на рис. 71. Основным элементом расходомера является гелиево-неоновый лазер, резонатор которого образован зеркалами 1, 4, 5, расположенными в вершинах треугольника, и активным элементом 9. Лазер генерирует две встречные волны, бегущие по замкнутым оптическим путям. Поток жидкости или газа, движущийся на некотором участке резонатора по трубопроводу 2 с прозрачными окнами 3, создает различные по знаку приращения оптических путей встречных волн лазера за счет составляющей проекции вектора скорости потока на направление луча. Вследствие этого различны и частоты встречных волн.

Часть энергии встречных лучей выводится из резонатора и зеркалами 6, 8 направляется на фотодетектор 7, в цепи которого появляется фототок разностной частоты биений, пропорциональной скорости потока, осредненной по пути луча.

Инструментальная погрешность описанных расходомеров определяется, в основном, погрешностью измерения частоты биений. Нестабильность частоты биений вызывается механическими вибрациями, изменением температуры окружающей среды, а также процессами, происходящими в плазме ОКГ. Известны „Физо-Френелевские” расходомеры, основная погрешность которых не превосходит 0,5 % верхнего предела измерений.

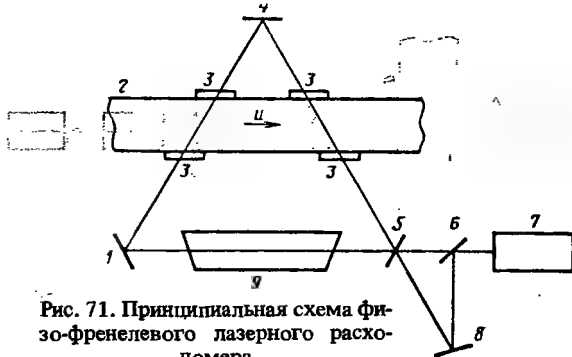


Рис. 71. Принципиальная схема физо-френелевого лазерного расходомера

Методические погрешности этих расходомеров обуславливаются непостоянством показателя преломления измеряемой среды и отличием скорости, осредненной по длине луча, от действительной средней скорости потока (аналогично, как у рассмотренных выше ультразвуковых расходомеров).

Особенно перспективны данные расходомеры для измерения расхода газов, поскольку частота выходного сигнала при показателях преломления, близких к единице (что характерно для большинства газов), пропорциональна массовому расходу.

## 7.7. Измерение расхода методом контрольных „меток“

Если создать в потоке измеряемой среды какую-либо „метку“ (какой-либо отличительный признак части потока, за перемещением которого можно проследить) и измерять время  $t_M$ , за которое эта „метка“ пройдет определенный фиксированный путь  $L_M$ , то, считая, что скорость перемещения „метки“  $v$  равна скорости потока, получим

$$v = \frac{L_M}{t_M} \quad (7.28)$$

Расходомеры, основанные на этом методе измерений (рис. 72), состоят из устройства, периодически создающего ту или иную „метку“ потока; устройства, фиксирующего момент прохождения „метки“, и прибора, измеряющего продолжительность перемещения „метки“ на фиксированное расстояние  $L_M$ .

На основании формулы (7.28) уравнение измерений этих приборов будет иметь вид

$$t_M = \varphi \cdot \frac{L_M F}{Q}, \quad (7.29)$$

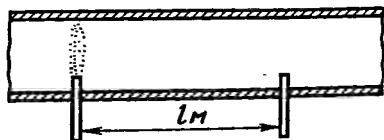


Рис. 72. Схема измерения расхода методом контрольных „меток“

где  $\varphi$  — коэффициент, зависящий от распределения скоростей по сечению потока и числа Рейнольдса.

Погрешности измерения при данном методе не нормируются. Метод, как правило, используется в лабораторных условиях для измерения расхода газа при сверхвысоких скоростях, т. е. там, где другие методы трудно применить.

### К контрольному вопросу № 13

Действительно, „закрутка” потока, вызванная сопротивлением первой турбинки, оказывает тормозящее действие на вторую.

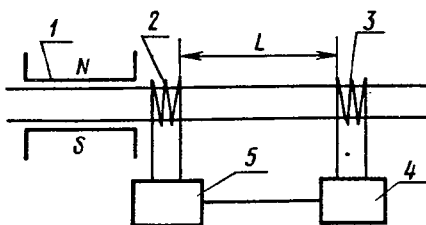
## 7.8. Расходомеры, основанные на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР-расходомеры)

Поляризованные в постоянном магнитном поле атомные ядра большинства элементов, помещенных в переменное осциллирующее поле, при угловой частоте осциллирующего поля, равной угловой скорости прецессии (колебаний относительно среднего положения) ядер (ларморовой частоте), взаимодействуют с ним, поглощая часть его энергии. При этом изменяется намагненность ядер, т. е. суммарный магнитный момент ядер в единице объема вещества.

Это явление — явление взаимодействия поляризованных ядер с резонансным осциллирующим полем называется ядерным магнитным резонансом.

Существует несколько принципов построения расходомерных устройств, основанных на ядерном магнитном резонансе. Во-первых, явление ядерного резонанса используется для создания „меток” в потоке жидкости.

Схема ЯМР-расходомера, работающего на принципе контрольных „меток”, показана на рис. 73. Жидкость проходит через магнитное поле, создаваемое магнитом 1 и поляризуется (ядра жидкости ориентируются



относительно силовых линий поля, что обуславливает ее намагненность). Протекая через катушку 2, на которую подается от генератора 5 переменное напряжение резонансной частоты, поляризованные ядра жидкости поглощают часть энергии осциллирующего поля, создаваемого катушкой, и жидкость деполаризуется. При периодическом отключении тока, питающего катушку 2, в потоке жидкости на выходе из катушки

Рис. 73. Схема ЯМР-расходомера, работающего на принципе контрольных меток

будут создаваться пакеты поляризованных молекул. Эти молекулы, пройдя фиксированное расстояние  $L$ , попадают в катушку 3, которая также питается переменным напряжением резонансной частоты. В моменты протекания поляризованных молекул через осциллирующее поле катушки 3 в ее цепи будет возникать сигнал ядерного магнитного резонанса, фиксируемый измерительной схемой 4. Таким образом, в данном случае измерение расхода сводится к измерению времени между моментом отключения напряжения от катушки 2 и моментом появления сигнала ядерного магнитного резонанса в схеме 4, связанной с катушкой 3. Уравнение измерений расходомеров данного типа не отличается от уравнения измерений метода контрольных „меток” (98).

Другой принцип работы ЯМР-расходомеров основан на зависимости амплитуды сигнала ядерного резонанса  $A$  от скорости течения жидкости  $v$ , открытой индийским ученым Сурианом

$$\frac{A - A_0}{A_0} = v \frac{t_p}{l}, \quad (7.30)$$

где  $A_0$  — амплитуда сигнала ядерного резонанса в неподвижной жидкости;  $t_p$  — постоянное для данной жидкости время продольной релаксации ядер;  $l$  — длина датчика, создающего резонансное поле.

Пользуясь выражением (7.30), рабочее уравнение данного типа ЯМР-расходомеров можно представить в виде

$$Q = K \left( \frac{A}{A_0} - 1 \right), \quad (7.31)$$

где постоянная  $K = lF/t_p$ ;  $F$  — калибр расходомера.

Принципиальная схема такого расходомера показана на рис. 74. Участок трубопровода помещен в сильное поляризующее поле. На концах участка монтируется датчик ядерного магнитного резонанса, на катушку которого подается переменное напряжение резонансной частоты. Поляризованная жидкость, протекая через датчик, дает сигнал ядерного резонанса, амплитуда которого зависит от расхода жидкости. Подобное устройство можно применять для измерения расхода жидкостей с большим количеством ядер (например, жидкости, содержащие водород или фтор), обеспечивающим достаточно большой сигнал ядерного резонанса. Концентрация ядер должна сохраняться постоянной, в противном случае будет изменяться чувствительность прибора. Концентрация ядер пропорциональна плотности, а следовательно, погрешность показаний прибора зависит от всех факторов (температуры, давления, концентрации и т. п.), влияющих на плотность измеряемой среды. Кроме того, погрешность показаний существенным образом зависит от качества стабилизации питающего напряжения и наличия внутренних (схемных) и внешних (вызываемых турбулентностью потока) шумов. При аппаратурном подавлении этих шумов (что ведет к большой сложности измерительной схемы) погрешность ЯМР-расходомеров при их градуировке на реальной измеряемой среде может быть сведена к погрешности порядка 0,5—1,0 % верхнего предела измерений.

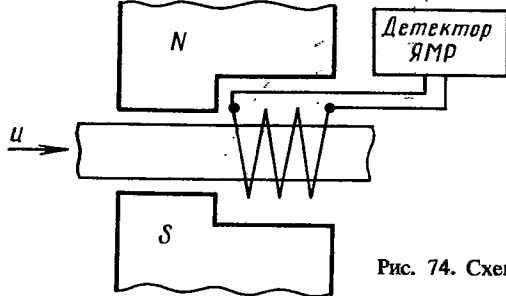


Рис. 74. Схема амплитудного ЯМР-расходомера

К достоинствам ЯМР-расходомеров (значительно окупающим их конструктивную сложность) относят: высокую чувствительность и малый нижний диапазон измерений; бесконтактность измерений; нечувствительность к перемене ориентировки трубопровода в пространстве; линейность шкалы и возможность использования их в системах контроля и регулирования в связи с малой инерционностью и электрическим выходным сигналом датчика в виде напряжения низкой частоты.

В настоящее время ЯМР-расходомеры применяются в основном при лабораторных исследованиях, в биологии и медицине (для измерения расхода крови).

## 7.9. Центробежные расходомеры

Центробежный расходомер (рис. 75) представляет собой 360-градусное колено (т. е. полную окружность) трубопровода, в верхней части которого на внешней и внутренней (по радиусу кривизны) стенках отбирают давления  $p_2$  и  $p_1$  соответственно. Ранее применялись и 90-градусные колена, но они не обеспечивали достаточной точности измерений, поэтому в настоящее время рекомендовано применять 360-градусные колена.

Принцип действия центробежных расходомеров основан на том, что при движении среды по криволинейному участку трубопровода появляются центробежные силы, создающие перепад давлений между точками с разными радиусами кривизны (где кривизна больше, там и центробежная сила больше и больше давление на стенку).

Полученные из условия равенства гидростатической и центробежной сил, действующих на элемент объема среды, текущей по криволинейному участку трубопровода (с радиусом кривизны его геометрической оси  $R_0$ ) рабочие уравнения измерений центробежных расходомеров имеют вид:

для капельных жидкостей

$$Q = \frac{\pi}{\psi} r \sqrt{R_0 r} \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{2\rho}}; \quad (7.32)$$

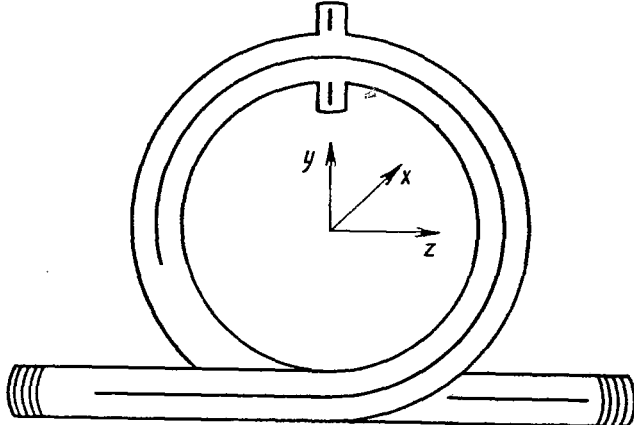


Рис. 75. Центробежный расходомер с круговым коленом

для газов

$$Q = \frac{\pi}{\xi \psi} r \sqrt{R_0 r} \sqrt{\frac{p_0}{2\rho} \ln \frac{p_2}{p_1}}, \quad (7.33)$$

где  $r$  — внутренний радиус (см. рис. 77) трубопровода;  $p_0 = 1/2 (p_1 + p_2)$ ;  $\psi$  — корректировочный коэффициент, зависящий от вязкости измеряемой среды и шероховатости трубопровода;  $\xi$  — коэффициент, характеризующий степень неизотермичности процесса сжатия газа в цилиндрическом колене.

При  $p_2/p_1 < 2$  как для жидкостей, так и для газов с достаточной для практики точностью можно использовать формулу (7.32).

Как показали широкие экспериментальные исследования американских прибористов В. Лансфорда, Д. Картеля и др., коэффициенты  $\psi$ ,  $\xi$  при прямолинейном участке трубопровода перед 360-градусным коленом расходомера, большем  $2R_0$ , стабильны и мало (на 1,0–1,5 %) отличаются от единицы в весьма широком диапазоне изменения вязкости измеряемой среды и ее расхода, что может быть объяснено малостью сил трения по сравнению с центробежными силами.

Отмеченное обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности косвенной (расчетной) градуировки центробежных расходомеров с круговым коленом по результатам измерений технологически качественно выдержанных геометрических параметров  $R_0$  и  $r$ . При этом их основная погрешность может быть „уложена“ в  $\pm 2,0$ –2,5 % верхнего предела измерений, что соответствует точности расходомеров с сужающими устройствами.

Существенным достоинством центробежных расходомеров является и малая степень влияния пульсационных характеристик потока на их показания. Действительно, так как давления  $p_1$  и  $p_2$  отбираются в одном



сечении потока (а не в разных, как у сужающих устройств) постоянные по сечению пульсационные составляющие будут компенсироваться при измерении разности давлений.

Простота и надежность центробежных расходомеров позволяет применять их в сложных эксплуатационных условиях, характерных для технологических процессов в нефтяной, газовой и химической промышленности.

## 7.10. Вихревые и гидродинамические расходомеры

Вихревые расходомеры сравнительно новые приборы, применяемые для измерения расхода жидкостей и газов с широким диапазоном изменения физико-химических свойств. Принцип действия этих расходомеров заключается в создании (с помощью винтообразных шнеков) в потоке движущейся по трубопроводу среды устойчивого периферийного вихря. Центральная часть потока (вблизи оси трубопровода) при этом приобретает характер винтового шнура. Если сформированный таким образом поток пустить через расширяющийся насадок, то периферийные вихреобразования теряют устойчивость, а центральный шнур начинает прецессировать (колебаться) относительно геометрической оси насадка с частотой, пропорциональной средней скорости потока, и амплитудой, равной диаметру выходной части насадка. С аналогичной частотой и амплитудой, равной скоростному напору  $\rho v^2$ , будет изменяться при этом и давление на выходе потока из насадка. Преобразовав с помощью амплитудно-частотного датчика (например, струнного) пульсации давления в электрический сигнал и поделив его амплитудное значение на частотное, получим величину, значение которой пропорционально массовому расходу вещества. Для нахождения объемного расхода достаточно измерить частотную составляющую сигнала.

Погрешность вихревых расходомеров при их индивидуальной градуировке на реальной измеряемой среде не превосходит 1,5–2,0 %.

Гидродинамические расходомеры основаны на измерении лобового давления ( $p_n$ ) движущейся среды, действующего на помещенное в поток тело.

На рис. 76 показаны схемы различных типов гидродинамических расходомеров, отличающихся друг от друга формой тела, воспринимающего гидродинамическое усилие  $R = c_n \rho v_{ср}^2 f / 2$  ( $f$  – площадь миделевого сечения тела – проекции тела на плоскость, перпендикулярную к направлению потока) и способом измерения гидродинамического усилия.

Для расходомеров с поворотным крылом (рис. 76, а) и поворотным диском (рис. 76, б) мерой расхода является поворот крыла или диска относительно оси вращения. Уравнение измерений этих приборов, полученное из условия равенства моментов гидродинамической силы и веса крыла (диска), имеет вид

$$Q = F \sqrt{\frac{2G}{c_n \rho f}} \sqrt{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (7.34)$$

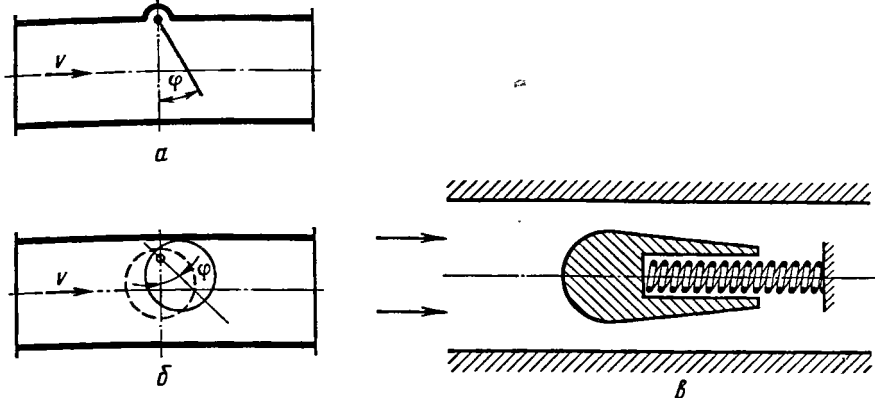


Рис. 76. Гидродинамические расходомеры

где  $F$  — площадь сечения трубопровода;  $f$  — площадь наибольшего сечения крыла или диска;  $G$  — вес крыла или диска;  $c_{\text{л}}$  — коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы и размеров тела обтекания (в данном случае крыла или диска) и чисел Рейнольдса. В расходомере с каплевидным телом обтекания (рис. 76, в) мерой расхода является деформация упругой пружины, а следовательно, и осевое перемещение  $l$  тела обтекания. Уравнение измерений этих приборов имеет вид

$$Q = F \sqrt{\frac{2c}{c_{\text{л}} \rho f}} \sqrt{l}, \quad (7.35)$$

где  $c$  — жесткость пружины.

Иногда и первые два типа гидродинамических расходомеров снабжаются упругими элементами в виде пластинчатых или струнных пружин.

Зависимость  $c_{\text{л}}$  от большого числа изменяющихся и неконтролируемых в процессе измерений параметров, нестабильность поля скоростей набегающего потока при перемещении тела обтекания являются источниками больших погрешностей этих расходомеров. Вследствие этого основные усилия их разработчиков направлены на отыскание таких форм и габаритных размеров тел обтекания, при которых в достаточно широком диапазоне изменений расхода обеспечивается автомодельность (постоянство)  $c_{\text{л}}$ . Наиболее полно этим требованиям отвечают крыловидные профили с перекрытием потока порядка 0,5–0,6 и тела обтекания, выполненные в виде концентрических окружностей с перемычками, наружный радиус которых составляет 0,754 радиуса проточной части трубопровода.

Достоинствами гидродинамических расходомеров являются их конструктивная простота, надежность и удобство обслуживания. На сегодняшний день их применяют в качестве индикаторов расхода загрязненных жидкостей и газов.

## 7.11. Приборы для измерения расхода в единицах массы (массовые расходомеры)

В системах автоматического регулирования теплоэнергетических установок, в ракетной и авиационной технике, в различных химических процессах массовый расход ( $M$ ) является основным физическим параметром, определяющим оптимальные режимы работы объектов и качество процессов. В связи с этим в последнее время у нас в стране и за рубежом интенсивно разрабатываются и внедряются различные приборы для измерения массового расхода. Развитие этой области расходомерии идет по трем направлениям. Во-первых, объемные расходомеры (переменного перепада давления, электромагнитные, турбинные и пр.) снабжаются соответствующими датчиками плотности и корректирующими схемами; во-вторых, создаются приборы, способные непосредственно измерять прямыми методами массовый расход благодаря особенностям своего принципиального устройства; в-третьих, находят применение комбинированные расходомеры, измеряющие массовый расход косвенными методами путем автоматической обработки результатов прямых измерений связанных с ним параметров.

### Контрольный вопрос № 14

На показания какого типа расходомеров — ультразвуковых или ЯМР-расходомеров — изменения вязкости измеряемой среды оказывают большее влияние?

Если Вы решите, что на показания ультразвуковых расходомеров — см. с. 182, если на показания ЯМР-расходомеров — см. с. 186.

### К контрольному вопросу № 13

Вы неправильно ответили на вопрос.

Разберитесь, что происходит с потоком измеряемой среды при ее течении через турбинный датчик, и как „закрутка” потока влияет на показания турбинных расходомеров.

Несмотря на многообразие предложенных принципиальных схем и конструктивных решений, массовые расходомеры прямого действия можно отнести к двум основным видам: инерционным и тепловым. Принцип действия инерционных расходомеров основан на том, что потоку измеряемого вещества сообщается дополнительное движение, чтобы создать в потоке инерционные эффекты, по которым судят о значении массового расхода. В зависимости от того, какое именно дополнительное движение сообщается потоку (при помощи вращающегося или колеблющегося звена), на чувствительном элементе прибора возникает или усилие Кориолиса, или гироскопический, или инерционный момент. Принцип действия тепловых расходомеров основан на непрерывном нагреве потока (калориметрические расходомеры) или специального элемента, помещенного в поток (термоанемометры). В первом случае массовый расход определяется количеством тепла, обеспечивающим определенную разность температур потока до и после нагревателя; во втором — количеством тепла, теряемым нагретым или непрерывно нагреваемым телом, помещенным в поток измеряемого вещества.

**Массовые турборасходомеры.** В турборасходомерах, реализующих инерционный принцип измерений, закручивают поток относительно вектора его актуальной (продольной) скорости.

Момент, необходимый для обеспечения устойчивого вращения потока с угловой скоростью  $\omega$ , определяется (без учета сил гидравлического трения) соотношением

$$M_{вр} = \frac{d}{dt} J\omega, \quad (7.36)$$

где  $J$  — момент инерции среды.

Учитывая, что  $dJ = R_n^2 dm$  ( $R_n$  — радиус инерции;  $m$  — масса вращающейся среды) и  $dm/dt = M$  ( $M$  — массовый расход среды), из выражения (7.36) получим общее для всех турборасходомеров уравнение для определения  $M$

$$M = \frac{M_{вр}}{\omega R_n^2}. \quad (7.37)$$

При торможении предварительно закрученного потока на тормозящее устройство будет действовать момент, соответствующий выражению (7.29), и уравнение приборов, использующих эффект торможения закрученного потока, не будет отличаться от выражения (7.37).

Существует большое число различных модификаций турбинных датчиков массового расхода, отличающихся способами вращения потока, измерения  $M_{вр}$  и значениями  $R_n$ .

Принципиальные схемы датчиков, получивших преимущественное распространение, приведены на рис. 77.

Основным источником методических погрешностей турборасходомеров является непостоянство сил трения в их гидравлическом тракте, обусловленное изменениями вязкости, температуры и других параметров измеряемой среды.

Погрешность измерения массового расхода турборасходомерами может быть доведена до  $\pm (0,5-1,0) \%$  верхнего предела измерений. Повышение точности лимитируется трудностями поддержания постоянного числа оборотов ведущей (закручивающей поток) турбинки, нестабильностью характеристик упругих элементов, воспринимающих действие инерционного звена, и изменением КПД приводного двигателя при изменении нагрузки (расхода). Кроме того, на показания турборасходомеров (как уже отмечалось выше) влияет изменение параметров измеряемой среды, а их надежность ограничивается наличием изнашивающихся опор.

**Кориолисовые и гироскопические расходомеры.** В этих расходомерах закручивание и торможение потока производится в помощью вращающихся элементов трубопровода сложной конфигурации.

Кориолисовый расходомер (рис. 78) состоит из двух Т-образных участков 2 и 6 трубопровода, сочлененных при помощи гибких соединений 1 и приводимых во вращение с постоянной угловой скоростью  $\omega$  специальным приводным механизмом. Прибор размещен в корпусе 5 (показан условно). При протекании вещества со скоростью  $v$  через вращающийся в уплотнительных муфтах 4 элемент трубопровода в потоке возникает направленное против вращения ускорение Кориолиса, равное

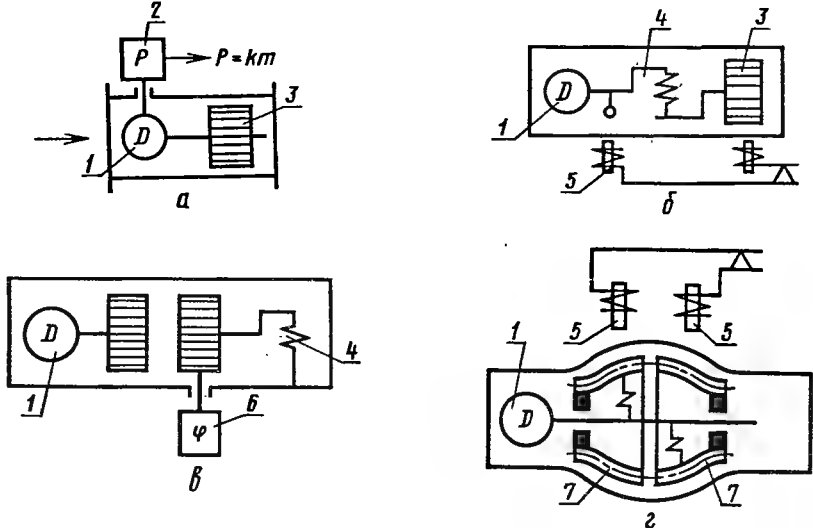


Рис. 77. Принципиальные схемы наиболее распространенных датчиков:

*a* — измеряется мощность, необходимая для закручивания потока; *б* — измеряется момент вращения по углу поворота упругой муфты; *в* — измеряется момент вращения заторможенной крыльчатки по углу ее поворота при упругом зацеплении; *г* — измеряется разность углов поворота двух крыльчаток, упруго закрепленных на валу двигателя; *д* — измеряется относительный угол поворота двух крыльчаток с разными углами поворота лопастей; *1* — двигатель; *2* — датчик мощности; *3* — прямолинейная крыльчатка; *4* — упругое соединение валов; *5* — импульсный датчик; *6* — датчик угла поворота; *7* — радиальная крыльчатка; *8* — спиральная крыльчатка

$a = 2\omega v$ . Вследствие этого в каждой ветви Т-образного участка создается усилие  $R_k = -m2\omega v = -2M\omega(R_2 - R_1)$  и на всем вращающемся участке возникает момент

$$M_k = 2R_k \frac{R_2 + R_1}{2} = 2M\omega (R_2^2 - R_1^2). \quad (7.38)$$

В результате действия этого момента Т-образные участки, деформируя гибкое соединение *1*, поворачиваются относительно друг друга на некоторый угол  $\alpha$ . Угол поворота  $\alpha$  преобразуется в электрический сигнал при помощи торсионного датчика *3*. Значение этого сигнала пропорционально  $M_k$ , а следовательно, при постоянной угловой скорости вращения и массовому расходу вещества.

Гироскопический расходомер (рис. 79) состоит из эксцентрично расположенных элементов трубопровода сложной конфигурации. Устрой-

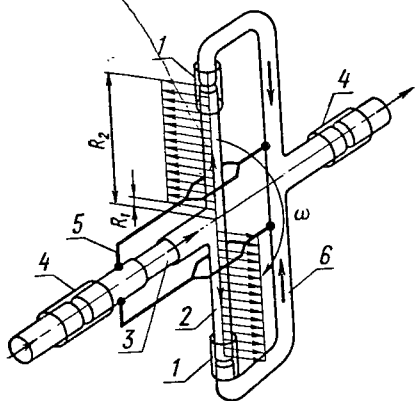


Рис. 78. Схема кориолисова расходомера

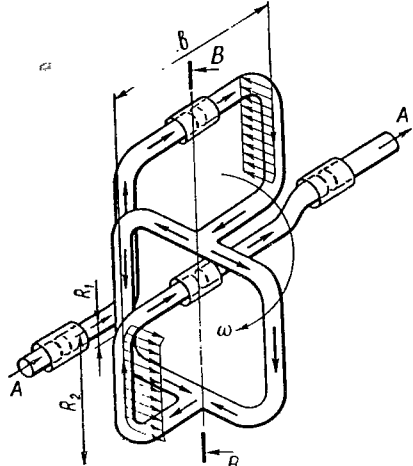


Рис. 79. Схема гироскопического расходомера

ство приводится во вращение относительно оси  $AA$  с постоянной угловой скоростью. Возникающий при этом гироскопический момент  $M_T$  стремится повернуть ротор относительно оси  $BB$ . Величина

$$M_T = 2M\omega(R_2 - R_1)b \quad (7.39)$$

пропорциональна массовому расходу вещества и преобразуется в соответствующий сигнал с помощью датчиков деформации (например, тензометрических).

Относительно невысокая точность кориолисовых и гироскопических расходомеров, характеризующая приведенной погрешностью 1–2 %, объясняется большими температурными влияниями на жесткость упругих элементов, их гистерезисом и последействием, а также трудностями поддержания постоянным числа оборотов приводного механизма, особенно при колебаниях расхода. Расходомеры данного типа громоздки, сложны в эксплуатации, требуют специальных вращающихся уплотнительных устройств и большой мощности приводного механизма.

Два последних недостатка отсутствуют у вибрационных расходомеров, у которых вращательное движение трубопровода заменяется колебательным. Однако точность вибрационных расходомеров получается меньшей.

Преимуществом кориолисовых и гироскопических расходомеров является полная независимость их показаний от вязкости измеряемой среды. Поэтому их целесообразно применять лишь для измерения массового расхода веществ с большим диапазоном изменения вязкости.

**Калориметрические и термоанемометрические расходомеры.** Если пренебречь теплом, отдаваемым потоком через стенки трубопровода в окружающую среду, то уравнение теплового баланса между расходом тепла, потребляемым нагревателем, и теплом, сообщенным потоку, принимает вид

$$q_t = k_0 M c_p \Delta T, \quad (7.40)$$

где  $k_0$  — поправочный множитель на неравномерность распределения температур по сечению трубопровода;  $c_p$  — теплоемкость (для газа при постоянном давлении) при температуре  $T_1 + T_2/2$ ;  $T_1, T_2$  — температуры потока до и после нагревателя;  $\Delta T = T_2 - T_1$ .

Тепло к потоку в калориметрических расходомерах подводится обычно электронагревателями, для которых

$$q_t = 0,24 I^2 R, \quad (7.41)$$

где  $I$  — сила тока;  $R$  — сопротивление нагревателя.

На основании выражений (7.40) и (7.41) получим уравнение измерений (статическую характеристику преобразования) калориметрических расходомеров

$$M = \frac{0,24 IR}{k_0 c_p \Delta T}. \quad (7.42)$$

Возможны и существуют два способа измерения массевого расхода в соответствии с выражением (7.42):

расход определяют по значению мощности, потребляемой нагревателем и обеспечивающей постоянную разность температур  $\Delta T$ ;

расход определяют по разности температур  $\Delta T$  при неизменной мощности, подводимой к нагревателю.

В первом случае расходомеры работают как регуляторы температуры нагрева потока, у которых измерительным и регулирующим элементом является уравновешенный мост с термометрами сопротивления до и после нагревателя. При изменении разности температур мост выходит из равновесия и включает устройство, которое изменяет регулировочное сопротивление до тех пор, пока не восстановится заданная степень нагрева. Массовый расход при этом определяют по показаниям ваттметра, включенного в цепь нагревателя.

Датчики калориметрических расходомеров второго типа (рис. 80) состоят из двух последовательно соединенных термометров сопротивления 1 и 3, устанавливаемых до и после нагревателя 2. Последовательное соединение термометров обеспечивает равенство токов в их цепях, что позволяет градуировать их непосредственно по разности температур. Кроме термометров сопротивления используют также термисторы и термопары. Термометры сопротивления обладают тем преимуществом, что их можно выполнять в виде равномерной сетки, перекрывающей все сечения потока, и таким образом измерять среднюю по сечению температуру.

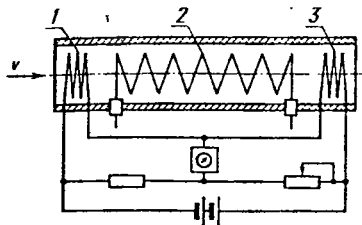


Рис. 80. Схема калориметрического расходомера

Калориметрические расходомеры обладают достаточно высокой точностью, оцениваемой (в условиях индивидуальной градуировки) приведенной погрешностью  $\pm (0,5-1,0) \%$ , большим диапазоном измерений (10:1 и выше), малой инерционностью.

Недостатками их являются сложность измерительных схем и нестабильность характеристик, связанная с коррозией приемных устройств и осаждением на них различных частиц, переносимых потоком.

Дачные приборы можно применять для измерения массового расхода как жидкостей, так и газов. Но в настоящее время ими измеряют, главным образом, малые (в трубках диаметром 2–3 мм) и средние расходы чистых газов.

Статическая характеристика преобразования (уравнение измерений) термоанемометров определяется известным уравнением теплофизики

$$q_T = 0,24 I^2 R = (T_H - T_c) (\lambda + \sqrt{2\pi c_v d} \sqrt{v\rho}), \quad (7.43)$$

где  $T_H$  — температура тела;  $T_c$  — температура потока измеряемой среды;  $\lambda$  — теплопроводность среды;  $c_v$  — теплоемкость среды при постоянном объеме;  $d$  — диаметр нагреваемого тела.

Термоанемометры измеряют „массовую” скорость  $v\rho$  потока в месте установки нагреваемого тела.

В последние годы появились бесконтактные термоанемометрические расходомеры, в которых роль термoeлемента играет изолированный участок трубопровода.

Как видно из уравнения (7.43), „массовую” скорость при помощи термоанемометра можно измерять двумя способами. В одном случае ток, нагревающий приемник, поддерживают постоянным, и скорость определяют по результатам измерения его температуры. В другом случае ток нагрева регулируют таким образом, чтобы температура приемника оставалась постоянной, а скорость определяют по значению питающего тока. В практике встречаются оба этих способа измерений.

Приемник термоанемометра (термонить) обычно выполняют из платиновой проволоки диаметром 0,005–0,3 мм. Температура термонити должна быть по возможности высокой, так как при ее увеличении повышается чувствительность приемника и уменьшается влияние колебаний температуры потока. Однако значительное повышение температуры проволоки может вызвать изменение структуры металла и тем самым „снос” градуировочных кривых прибора.

Основным недостатком термоанемометров является существенное влияние на их показания температуры, давления и различных теплофизических параметров измеряемой среды.



В связи с очень малыми габаритными размерами приемника (термонити) приборы получили преимущественное распространение в лабораторно-экспериментальной практике при измерении скоростей в тончайших пристенных слоях и пленках жидких и газообразных потоков. До появления оптических (лазерных) методов термоанемометры были единственными приборами, позволяющими проводить такие измерения.

Погрешности термоанемометров до настоящего времени полностью не изучены, и точность выполняемых с их помощью измерений не нормируется.

**Комбинированные турбопоршневые расходомеры.** Одним из примеров, иллюстрирующим возможность комбинированного измерения массового расхода, являются турбопоршневые расходомеры, состоящие из турбинного с аксиальной крыльчаткой и поршневого преобразователей. Угловая скорость вращения турбинки пропорциональна объемному расходу среды, протекающей по трубопроводу,

$$\omega = k_1 Q, \quad (7.44)$$

Поршневой преобразователь воспринимает и передает на регистрирующий или показывающий прибор гидродинамическое давление потока, действующее на ступицу турбинки и равное

$$p = k_2 \rho Q^2, \quad (7.45)$$

где  $k_1, k_2$  — коэффициенты пропорциональности, в общем случае зависящие от числа Рейнольдса и конструктивных параметров преобразователей.

Поделив выражение (7.45) на выражение (7.46), т. е. поделив показания поршневого преобразователя на показания турбинного, получим рабочие уравнения измерений турбопоршневых расходомеров. Так, при измерении массового расхода

$$M = A_M \frac{p}{\omega}, \quad (7.46)$$

где  $A_M = k_1/k_2$ ;

при измерении плотности протекающей среды

$$\rho = A_\rho \frac{p}{\omega^2}, \quad (7.47)$$

где  $A_\rho = k_1^2/k_2$

Используя формулы (7.46) и (7.47), по результатам измерений угловой скорости и гидродинамического давления при известных (определенных в процессе градуировки приборов) коэффициентах  $A_M$  и  $A_\rho$  можно рассчитать значения массового расхода и плотности протекающей среды.

Турбопоршневой расходомер (рис. 81) работает следующим образом. Турбинка 11 жестко закреплена на поршне 8, который может перемещаться вдоль оси и вращаться относительно неподвижного цилиндра 9, закрепленного в опоре 10. Все детали прибора помещены в корпусе 2.

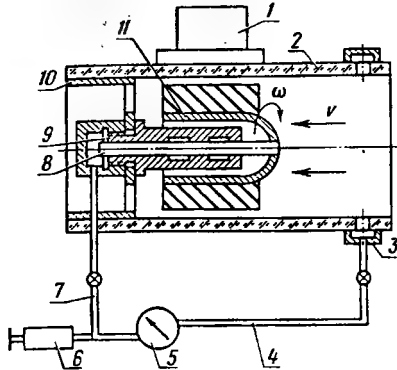


Рис. 81. Схема турбопоршневого расходомера

В цилиндре 9 создается давление, пропорциональное статическому давлению в потоке и гидродинамическому напору, действующему на турбинку 11 и поршень 8 в аксиальном направлении. Это давление по трубке 7, заполненной специальной манометрической жидкостью, передается в одну из полостей дифференциального манометра 5. Во вторую полость дифманометра по трубке 4 подается статическое давление, отбираемое из кольцевой камеры 3. Следовательно, дифманометр 5 будет измерять только динамическую составляющую давления потока, действующую на поверхность турбинки и выра-

жаемую формулой (7.45). Поршневая пара 8—9 имеет микронные зазоры, что обеспечивает чисто жидкостное трение в поршневом датчике и весьма малые утечки манометрической жидкости, заполняющей систему дифманометра. Для пополнения утечек в систему введен пресс 6. Угловая скорость вращения турбинки измеряется счетным устройством 1.

Основными достоинствами турбопоршневых расходомеров являются:

- возможность одновременного и комплексного измерения объемного, массового расхода и плотности протекающей по трубопроводу среды;
- высокая точность измерений, обусловленная объединением в этих приборах двух прецизионных измерительных преобразователей — турбинного и поршневого и характеризуемая погрешностями измерений объемного расхода 0,1—0,2 %, массового расхода и плотности 0,3—0,5 %;
- отсутствие опор с сухим трением, а следовательно, высокая стабильность и надежность турбопоршневых приборов.

Специфическим недостатком данных расходомеров являются утечки манометрической жидкости в измеряемую среду. Однако эти утечки могут быть сведены к ничтожно малым известными и применяемыми в системах с неуплотненным поршнем конструктивными мероприятиями. При измерении же расхода нефтепродуктов и других жидкостей, которые могут быть использованы в поршневых системах при соответствующем подборе материалов поршневых пар в качестве манометрических, этот недостаток вообще не сказывается.

В связи с достаточно высокой точностью и надежностью турбопоршневые расходомеры используют в настоящее время в качестве образцовых расходоизмерительных устройств.

Естественно, возможны и другие комбинированные системы для измерения массового расхода, например, одновременное использование

сужающего устройства и турбинного датчика и пр. Однако точностные возможности этих систем получаются существенно меньшими.

## **7.12. Техника измерения расхода жидкостей и газов в трубопроводах больших диаметров**

Проблема измерения расхода в трубопроводах больших диаметров (свыше 1 м) является самостоятельной расходоизмерительной проблемой, которая решается своим специфическим путем. Это обуславливается тем, что использование для этих целей расходомеров, реализующих традиционные методы (описанные в предыдущей главе), требует колоссальных затрат как на создание самих приборов, так и на создание средств их индивидуальной градуировки и поверки, которые в настоящее время практически полностью отсутствуют.

Последнее обстоятельство и определяет, в основном, те специфические требования, которые предъявляются к методам и средствам измерения расхода в трубопроводах больших диаметров:

возможность косвенной (расчетной) градуировки без применения расходомерных стендов и установок;

инвариантность (независимость) градуировочных характеристик к диаметру трубопровода или возможность их пересчета с малых диаметров (для которых имеются образцовые установки) на сколь угодно большие.

### **Контрольный вопрос № 15**

При некоторых режимах работы сечение технологического трубопровода диаметром 100 мм лишь частично заполняется текущей жидкостью (трубопровод в месте установки расходомера „работает” неполным сечением).

Какой из известных Вам типов расходомеров Вы бы выбрали для измерений при этих условиях?

Ответ на этот общий по гл. 7 вопрос дан в конце гл. 8.

### **К контрольному вопросу № 14**

Вы правильно ответили на вопрос.

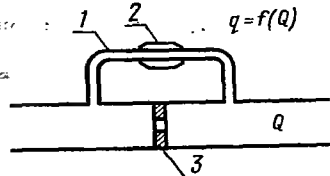
Действительно, показания ультразвуковых расходомеров зависят от распределения скоростей по сечению потока, которое в свою очередь зависит от числа Рейнольдса и, следовательно, от вязкости. В то же время, как следует из принципа действия и рабочего уравнения ЯМР-расходомеров, изменения вязкости измеряемой среды не влияют на их показания.

**Парциальный метод измерения расхода** основан на измерении расхода определенной части основного потока, отведенной в байпасную или обводную трубку.

Часть потока отводится обычно при помощи сужающего устройства, установленного в трубопроводе так, как это показано на рис. 82.

Для измерения расхода в байпасной трубке можно применять любой из рассмотренных в гл. 7 расходомеров.

Рис. 82. Схема осуществления парциального метода измерения расхода:  
1 — байпасная трубка; 2 — расходомер; 3 — диафрагма, установленная в основном трубопроводе



Если между расходом  $Q$  в основном трубопроводе и расходом  $q$  в байпасе существует стабильная функциональная зависимость  $Q = f(q)$ , то по результатам измерения  $q$  в каждом конкретном случае можно определить  $Q$ . Для этого необходимо лишь определить зависимость между  $Q$  и  $q$  при непосредственной (в ограниченной области) или расчетной градуировке (например, по соотношению сопротивлений основного и байпасного трубопроводов).

Погрешность измерения расхода парциальным методом будет складываться из погрешностей установления и стабильности зависимости  $Q = f(q)$  и измерения расхода в байпасе.

**Измерение расхода методом гидравлического удара.** Гидравлический удар, возникающий при быстром перекрытии потока капельной жидкости (за счет инерционного воздействия внезапно остановленной массы жидкости), вызывает колебания давления в трубопроводе, фронт которых распространяется со скоростью звука. Процесс изменения давления в сечении трубопровода, находящемся на расстоянии  $L$  перед перекрывающей поток задвижкой, графически изображен на рис. 83, на котором

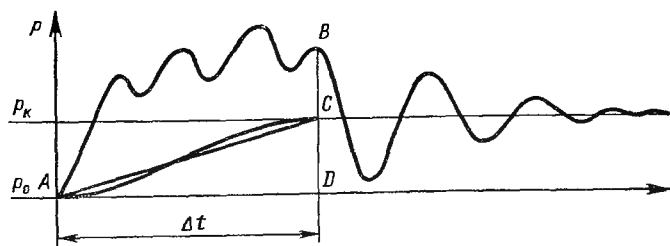


Рис. 83. График изменения давления в трубопроводе при гидравлическом ударе

$p_0$  — начальное статическое давление в контрольном сечении;  $p_K$  — конечное статическое давление в том же сечении. Точка  $A$  соответствует началу перекрытия потока задвижкой, точка  $B$  — окончанию. Затухающие колебания после закрытия задвижки (по истечении времени  $\Delta t$ ) характеризуют лишь инерционные свойства прибора, примененного для записи изменений давления.

Линия  $AC$  характеризует изменение давления, связанное с изменением гидравлического сопротивления задвижки при перемещении ее затвора, а линия  $AB$  — изменение давления вследствие гидравлического удара.

Закон количества движения при гидравлическом ударе имеет вид

$$\rho L Q = F \int_0^{\Delta t} \Delta p \, dt, \quad (7.48)$$

где  $\int_0^{\Delta t} \Delta p \, dt$  — импульс ударной волны, равный площади  $f_d$  диаграммы

изменения давления (см. рис. 83), ограниченной линиями  $AB$  и  $AC$ ;  $F$  — площадь сечения трубопровода.

Откуда искомый объемный расход

$$Q = \frac{F}{\rho L} f_d. \quad (7.49)$$

Таким образом, планиметрируя диаграмму изменения давления, измерив предварительно диаметр трубопровода (а, следовательно, и  $F$ ), длину контрольного участка  $L$  и плотность протекающей среды, по выражению (7.49) можно рассчитать объемный расход.

Данный метод применяют при испытаниях гидравлических машин и насосов, т. е. в тех случаях, когда расход можно измерять после воспроизведения (а не в процессе испытаний) определенных режимов испытаний.

**Измерение расхода с помощью интегрирующей трубки.** Интегрирующая трубка представляет собой цилиндрический зонд, полностью пересекающий поток по диаметру водовода. По образующей трубки просверлен ряд отверстий для отбора давления набегающего потока.

Статическая характеристика интегрирующей трубки имеет вид

$$Q = \varphi \omega \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}, \quad (7.50)$$

где  $\Delta p$  — перепад давлений, отбираемых в конце интегрирующей трубки и со стенок водовода;  $\varphi$  — коэффициент расхода трубки;  $\omega$  — площадь сечения отверстий.

Автомодельность коэффициента расхода  $\varphi$  для трубок с отношением толщины стенки к диаметру отверстия, равным 0,33, наступает при числах Рейнольдса, больших  $10^6$ . Значение  $\varphi$  при этом устойчиво стремится к единице.

В этих условиях возможность расчетной градуировки интегрирующих трубок обуславливается соответствием величины  $\sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$  средней скорости потока.

Однако влияние температуры измеряемой среды, пульсаций давления и расхода, трудности технологического порядка не позволяют на сегодняшний день получить погрешности измерения расхода интегрирующими трубками, меньшие 6–8 %. Кроме того, область применения дан-

ных устройств ограничивается измерением расхода чистых однофазных веществ.

**Методы смешения.** Принцип измерений, лежащий в основе этих методов, заключается в следующем. В протекающее по трубопроводу вещество вводят раствор реагента („прививку”) и определяют кратность разбавления этого реагента в потоке вещества.

Уравнение баланса реагента, вводимого в поток, имеет вид

$$qC_1 + QC_0 = (Q + q)C_2, \quad (7.51)$$

где  $q$  — расход раствора реагента, вводимого в поток;  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  — концентрации реагента соответственно в среде до „прививки” в растворе реагента и в смеси, отбираемой из потока после „прививки”.

В соответствии с выражением (7.51) уравнение измерений данным методом будет

$$Q = \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} q = Kq, \quad (7.52)$$

где  $K = \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$  — коэффициент разбавления.

Если в самом измеряемом веществе не содержится примесей вводимого реагента или они ничтожно (по сравнению с  $C_2$ ) малы, то  $K = C_1/C_2 - 1$ .

Расход  $q$  может быть измерен с достаточно высокой точностью, чего нельзя сказать о точности измерения величины  $K$ . Действительно, если концентрация реагента ( $C_2$ ) в отбираемом из потока пробе ненамного превышает его концентрацию в „чистой” среде ( $C_0$ ), а именно к этому и стремятся при реализации метода, то даже незначительные погрешности измерений  $C_2$  и  $C_0$  приведут к существенно недостоверной оценке величины  $K$ .

Другой разновидностью методов смешения является метод интегрирования, заключающийся в том, что в поток вещества за малый промежуток времени вводят определенную объемную порцию  $V$  раствора реагента и непрерывно (в течение времени  $t$ ) следят за изменением концентрации  $C$  реагента в потоке.

Уравнение этого метода, полученное на основе баланса объемных количеств реагента, имеет вид

$$Q = \frac{V}{\int_0^t C dt}. \quad (7.53)$$

Методы смешения используют в настоящее время исключительно для измерения расхода воды в цилиндрических водоводах. В качестве реагентов в растворах, с концентрацией  $10^{-4}$ – $10$  мг/л применяют дихромат натрия, хлорид натрия, родамин и другие химически пассивные к воде вещества (в основном, соли). Применяют и радиоактивные „прививки”, например, изотопы брома, натрия, йода. Использование радиоактивных реагентов позволяет осуществить бесконтактные измерения, однако требует обеспечения специальных условий работы.

Основным источником погрешности определения расхода методами смешения является неравномерность распределения концентрации вводимого реагента по сечению, в котором отбирают пробы. Относительная неравномерность распределения концентрации, а следовательно, и вызываемая ею погрешность, зависит от расстояния  $L_c$  между устройствами для ввода раствора реагента в поток и отбора проб (расстояния смешения), а также характеристик потока. Для обеспечения приемлемых (меньших 1,5 %) значений погрешности  $L_c$  должно быть большим  $60D$  ( $D$  — диаметр трубопровода).

Предложено несколько способов уменьшения неравномерности распределения концентрации и сокращения  $L_c$ . Например, одновременное впрыскивание раствора реагента с помощью ряда инжекторов, равномерно расположенных на кольцевой линии, радиус которой составляет 0,63 радиуса трубопровода; искусственная турбулизация потока на участке смешения с помощью различных местных сопротивлений; отбор проб в нескольких точках сечения потока и определение осредненной концентрации. Особенно эффективен последний способ.

При соблюдении оптимальных условий погрешность измерения расхода методами смешения (без учета влияния турбулентности, изменений температуры, наличия примесей и т. п.), по-видимому, может быть оценена в 1,5–2,5 % верхнего предела измерений. Однако достоверных данных на этот счет до настоящего времени не имеется.

Основным достоинством методов смешения является отсутствие необходимости определения площади сечения трубопровода.

„Точечные” методы основаны на измерении локальной скорости в одной какой-либо точке потока и определении расхода по теоретической или эмпирической зависимости между измеренной локальной и средней скоростями потока.

Локальную (местную) скорость можно измерять различными методами (оптическими, акустическими, тепловыми) и приборами (трубки скоростного напора, микровертушки, термоанемометры, электромагнитные измерители скорости и др.).

По существу, если известна модель развитого турбулентного потока, с достаточной точностью описывающая распределение его скоростей, то локальную скорость при реализации „точечного” метода можно измерять в любой фиксированной точке потока. Однако отсутствие такой (метрологически пригодной) модели обусловило практическое использование на сегодняшний день лишь двух модификаций „точечного” метода — метода средней скорости и метода максимальной скорости.

#### К контрольному вопросу № 14

Вы неправильно ответили на вопрос.

Разберитесь как следует в физических принципах, лежащих в основе ультразвуковых и ЯМР-расходомеров. Ведь вполне возможно, что в своей практической деятельности Вам придется столкнуться с этими новыми достаточно универсальными расходоизмерительными устройствами.

Суть первого метода заключается в измерении локальной скорости в точке, где скорость равна средней скорости потока. Тогда по результатам предварительных измерений диаметра трубопровода и показаниям измерителя местной скорости (ИМС) можно определить расход.

По уточненным данным А.Д. Альтшуля ордината точки, где скорость равна средней скорости развитого осесимметричного турбулентного потока

$$r_0 = 0,777R, \quad (7.54)$$

где  $R$  — радиус трубопровода в месте установки ИМС.

Соотношение (7.54) и положено в основу метода средней скорости.

Погрешности измерений  $r_0$ , установки ИМС, изменение местоположения точки средней скорости при изменении чисел Рейнольдса, коэффициента гидравлического трения, турбулентные пульсации — все это обуславливает погрешность измерения данным методом, равную 4–6 % верхнего предела измерений.

Второй метод — метод максимальной скорости заключается в измерении скорости на оси трубопровода (максимальной) и определении расхода по уточненным соотношениям между максимальной и средней скоростями потока.

Достоинствами второго метода являются: стабильность ординаты точки (всегда жестко фиксирована на геометрической оси осесимметричного потока), в которой скорость максимальна; независимость ординаты от чисел Рейнольдса и характеристик потока; наибольшая удаленность места установки ИМС от стенок трубопровода, что существенно снижает требования к его габаритным размерам. Так, при установке ИМС в точке средней скорости наибольшая площадь сечения ИМС не должна превышать 0,01 площади сечения трубопровода, при установке же ИМС на оси трубопровода отношение площадей может быть увеличено до 0,06.

Использование наиболее универсального соотношения между средней и максимальной скоростями развитого осесимметричного турбулентного потока дает следующее рабочее уравнение измерений расхода методом максимальной скорости

$$Q = \pi R^2 S (0,75 + 0,0275 \lg \frac{SR}{\nu}) \quad (7.55)$$

( $S$  — показания ИМС, установленного на оси трубопровода радиусом  $R$ ) и позволяет оценить погрешность метода в 3–5 % верхнего предела измерений.

Суть кросс-корреляционного метода заключается в определении функции корреляции между случайными пульсациями скорости в двух точках ( $A$  и  $B$ ) турбулентного потока, отстоящими друг от друга на расстоянии  $L$ .

Так как функция корреляции случайных величин характеризует степень их связи и степень их взаимообусловленности во времени, то очевидно, что максимум ее будет соответствовать времени перемещения



турбулентных возмущений из точки  $A$  в точку  $B$  (так как степень временной взаимообусловленности тех же самых пульсаций, естественно, максимальна).

Полученный вывод справедлив и для осредненных по сечению потока пульсационных составляющих скоростей.

Таким образом, зафиксировав пульсационные составляющие скоростей в двух сечениях потока, отстоящих друг от друга на расстояние  $L$ , определив (с помощью специального прибора – коррелографа) функцию корреляции между ними и измерив (автоматически или непосредственно по рис. 84) значение времени  $\tau_m$ , соответствующее максимуму (пику) этой функции  $\psi_{xy}$ , можно определить расход потока по формуле

$$Q = F \frac{L}{\tau_m}. \quad (7.56)$$

Сам метод прост, однако его аппаратная реализация, требующая наличия ультразвуковых или лазерных измерителей пульсационных составляющих скоростей, коррелографа и устройств автоматической регистрации  $\tau_m$  довольно сложна.

При компенсации наиболее существенных методических и аппаратных погрешностей точность метода соответствует приведенной погрешности  $\pm(2-2,5) \%$  в диапазоне значений измеряемых расходов 15:1.

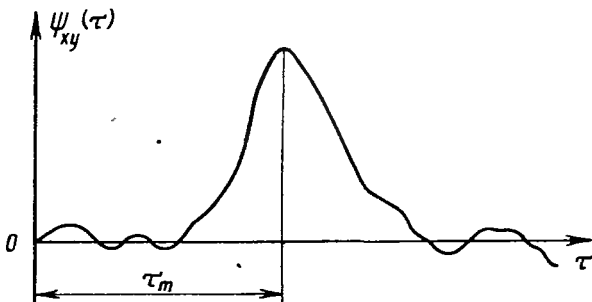


Рис. 84. Кросс-корреляционная функция турбулентного потока

#### К контрольному вопросу № 15

Сравните уравнения измерений расходомеров, описанных в гл. 2, и убедитесь, что единственно пригодными для этих условий измерений являются гироскопические или кориолисовы расходомеры.

### 7.13. Измерение расхода многофазных сред

В расходоизмерительной практике довольно часто встречаются задачи, связанные с измерением расхода двух- или трехфазных сред. К наибо-

лее типичными промышленными средами относятся влажный пар, нефтегазовые смеси, пульпы, пылеугольное топливо (смесь воздуха с угольным порошком), водогрунтовые смеси, низкокипящие криогенные вещества, поток которых в отдельных случаях представляет смесь жидкой, газообразной и твердой (шуги) фаз.

Трудности обеспечения приемлемой (в некоторых случаях довольно высокой, характеризваемой допускаемой погрешностью 2–3 %) точности измерения расхода таких сред обуславливаются множеством физических и технических причин, главные из которых — различие скоростей течения фаз через первичные преобразователи применяемых расходомеров (например, сужающие устройства); неоднородность распределения фаз по сечению потока; значительные флуктуации скоростей, давлений и концентраций фаз.

Основными параметрами многофазных сред, определяющими отличительные особенности их движения по трубам и степень влияния указанных выше причин на точность измерения расхода, являются массовая концентрация фаз в потоке и их плотность. Вследствие этого, как правило, приходится измерять расход таких сред в единицах массы (массовый расход) или объемный расход и плотности фаз, что также вносит дополнительные технические трудности.

Наличие значительных флуктуаций параметров многофазных сред при их течении по трубам и каналам затрудняет, а в ряде случаев делает невозможным, измерение мгновенных или осредненных за малый промежуток времени значений расхода. Так, при движении газожидкостных смесей по трубам при некоторых концентрациях (относительном содержании) жидкой и газообразной фаз и определенных скоростях поток смеси приобретает „пробковый” характер (смесь движется в виде последовательных „пробок” жидкости и газа, занимающих все сечение трубопровода, — то только жидкость, то только газ). Естественно, при этом понятие мгновенного расхода смеси теряет смысл.

Вследствие отмеченного на практике в большинстве случаев измеряют средний (осредненный за достаточно большой промежуток времени — не менее 40–60 с) расход многофазных потоков.

Среди множества измерительных задач, возникающих в практике измерения расхода многофазных сред, можно выделить две наиболее типичные:

- 1) измерение общего (суммарного) расхода среды (смеси);
- 2) измерение расхода отдельных компонентов (фаз) смеси, например, сухой части влажного пара или твердой фазы во взвешенном потоке.

Каждая из этих задач решается своими специфическими техническими способами и приемами.

Так, для измерения общего (суммарного) расхода  $M_c$  диспергированных двухфазных сред (сухой пар + влага; воздух + угольная пыль и т. п.) наиболее распространены расходомеры с сужающими устройствами.

Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, рабочая формула измерений при этом (связь между расходом и перепадом давлений  $\Delta p$  на сужающем устройстве) имеет вид

$$M_c = \alpha \epsilon \beta F_0 \sqrt{2 \rho_c \Delta p} . \quad (7.57)$$

Данная формула отличается от рассмотренных ранее уравнений метода переменного перепада давлений тем, что в нее входит коэффициент  $\beta$ , зависящий в общем случае от массовой концентрации  $\eta$  тяжелой фазы (массовой доли тяжелой фазы в смеси), плотностей легкой  $\rho_{\text{л}}$  и тяжелой  $\rho_{\text{т}}$  фаз, геометрии сужающего устройства и скоростей течения фаз в приемном преобразователе. Кроме того, сомножителем перед  $\Delta p$  в данную формулу входит плотность смеси

$$\rho_c = \frac{\rho_{\text{л}}}{1 - \eta \left(1 - \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{т}}}\right)} . \quad (7.58)$$

Если скорости легкой и тяжелой фаз при течении смеси через приемный преобразователь несущественно отличаются друг от друга (что характерно, например, для стандартных диафрагм, у которых участок сужения при достаточно больших  $m$  очень короткий и вследствие этого частицы тяжелой фазы на этом участке почти не ускоряются), то в ограниченной области значений  $\eta$  ( $\eta \leq 0,2$  — для влажного пара;  $\eta \leq 0,35$  — для смеси воздуха с угольным порошком) коэффициент

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \eta}} . \quad (7.59)$$

Во многих случаях отношение  $\rho_{\text{л}}/\rho_{\text{т}}$  много меньше 1. Так, для влажного пара  $\rho_{\text{л}}/\rho_{\text{т}} = 0,001-0,005$ ; для пылеугольного топлива это отношение еще меньше.

Тогда на основании формулы (7.58)

$$\rho_c \approx \frac{\rho_{\text{л}}}{1 - \eta} \quad (7.60)$$

и уравнение измерений (7.57) с учетом выражений (7.59), (7.60) преобразуется к виду

$$M_c (1 - \eta) = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{2 \rho_{\text{л}} \Delta p} . \quad (7.61)$$

Как следует из этой формулы, перепад давлений на диафрагме (при сделанных допущениях и в ограниченной области значений  $\eta$ ) характеризует лишь массовый расход  $M_{\text{л}} = M_c (1 - \eta)$  легкой фазы. Этот вывод, подтвержденный экспериментально, объясняется тем, что при принятом равенстве скоростей легкой и тяжелой фаз энергия на ускорение тяжелой фазы не затрачивается.

Таким образом, при использовании стандартной диафрагмы расход легкой фазы (сухой части влажного пара или воздуха для пылеугольного топлива) может быть определен по уравнению

$$M_{\text{л}} = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{2 \rho_{\text{л}} \Delta p_{\text{д}}} , \quad (7.62)$$

где  $\Delta p_{\text{д}}$  — измеренный перепад давлений при течении смеси; коэффициент расхода  $\alpha$  принимается равным табличному значению.

При известной массовой концентрации тяжелой фазы  $\eta$  полный расход смеси вычисляют по формуле

$$M_c = \frac{M_n}{1 - \eta}; \quad (7.63)$$

расход тяжелой фазы

$$M_T = M_c \eta = M_n \frac{\eta}{1 - \eta}. \quad (7.64)$$

В случае, если  $\eta$  неизвестна или изменяется в процессе измерений, приходится определять ее по результатам измерения перепада давлений на дополнительно устанавливаемых в поток смеси трубе или сопле Вентури —  $\Delta p_v$ . Отношение (или разность)  $\Delta p_v$  и  $\Delta p_d$  характеризует часть энергии потока, затрачиваемой на ускорение твердой фазы при течении смеси через трубу или сопло Вентури (напомним, что при течении смеси через диафрагму ускорение твердой фазы практически не наблюдается). Следовательно, данное отношение будет пропорционально содержанию твердой фазы  $\eta$ .

Для расчетов  $\eta$  используют экспериментально-апробированную зависимость

$$\beta_0 \frac{\eta}{1 - \eta} = \frac{\Delta p_v}{\Delta p_d} - 1, \quad (7.65)$$

где  $\beta_0$  — коэффициент, зависящий от свойств твердой фазы и геометрии применяемых сужающих устройств и определяемый путем опытной градуировки комплекта расходомеров.

Тогда в соответствии с формулой (7.65)

$$\eta = \frac{A}{A + \beta_0}, \quad (7.66)$$

где  $A = \Delta p_v / \Delta p_d$ .

Таким образом, при измерениях расхода методом переменного перепада давлений двухфазных сред с неизвестной массовой концентрацией твердой фазы измеряют перепады давлений на двух последовательно установленных сужающих устройствах (диафрагме и сопле или трубе Вентури), по формулам (7.61) и (7.66) рассчитывают расход легкой фазы и  $\eta$ , а затем по формулам (7.63) и (7.64) — общий расход смеси и расход твердой фазы. Расчетные операции при этом могут выполняться вычислительными устройствами, сблокированными со вторичными преобразователями расходомеров.

Еще раз подчеркнем, что все изложенное справедливо для хорошо диспергированных двухфазных потоков с равномерной концентрацией фаз и в ограниченной области значений  $\eta$ .

Расходомеры переменного перепада давлений довольно часто применяют и для измерения расхода различных пульп и водогрунтовых смесей. Характерной особенностью данных сред является то, что плотности их легкой и тяжелой фаз мало отличаются друг от друга. В этом случае сум-

матричный расход смеси определяются по уравнению (7.57), в котором коэффициент  $\beta$  принимают равным единице.

Расход смесей твердой и жидкой (или газообразной) фаз измеряют комбинированными методами, основанными на определении общего объемного расхода смеси и содержания в ней твердой фазы. Объемный расход смеси измеряют при этом с помощью электромагнитных, ультразвуковых, ядерно-магнитных и расходомеров других типов, приемные преобразователи которых не имеют выступающих внутрь потока элементов. Расходомеры устанавливают на вертикальных участках трубопровода для предотвращения скапливания более тяжелой фазы в нижней части сечения трубы.

Содержание твердой фазы определяют по показаниям радиоизотопных концентратомеров, радиоактивных или компенсационных весовых плотномеров. Наибольшее применение находят весовые плотномеры, представляющие собой участок трубопровода с гибкими сочленениями, подвешенный на ленточных опорах. При изменении массы смеси, протекающей по данному участку, он перемещается в вертикальном направлении вместе с плунжером индуктивной катушки. Перемещение плунжера вызывает сигнал рассогласования, приводящий во вращение электродвигатель. При этом изменяется натяжение уравнивающей пружины, что возвращает участок в исходное положение. Угол поворота электродвигателя, фиксируемый ферродинамическими преобразователями, является мерой плотности протекающего вещества.

Компенсационные весовые плотномеры в комплекте с электромагнитными расходомерами получили преимущественное применение для измерения расхода твердого топлива (угля, торфа) при его гидротранспорте.

Расход пульп, сыпучих материалов, нефтегазовых смесей измеряют и массовыми расходомерами, в основном — кориолисовыми. Предпочтительное применение этих расходомеров объясняется тем, что измеряемая среда в приемном преобразователе кориолисовых расходомеров (см. рис. 78) движется перпендикулярно к оси вращения потока и вследствие этого „кориолисовы” усилие и момент не зависят от распределения фаз.

В заключение отметим, что совершенствование техники измерений расхода многофазных сред сдерживается отсутствием высокоточных образцовых стендов и установок, способных воспроизводить все характерные особенности течения таких сред (структуру потока, геометрию и распределение фаз). И хотя кое-какие сдвиги в этой области определенно наметились, работы здесь „непочатый край”.

Одной из перспективных отечественных разработок, восполняющих этот пробел, является созданная во Всесоюзном научно-исследовательском институте расходомерии (ВНИИР) исходная образцовая установка, реализующая принцип смещения потоков жидкости и газа для воспроизведения и измерения параметров газожидкостных потоков (рис. 85). Установка работает следующим образом. Жидкость (вода) из резервуара 10 насосом 13 через систему стабилизации напора, состоящую из бака 8,

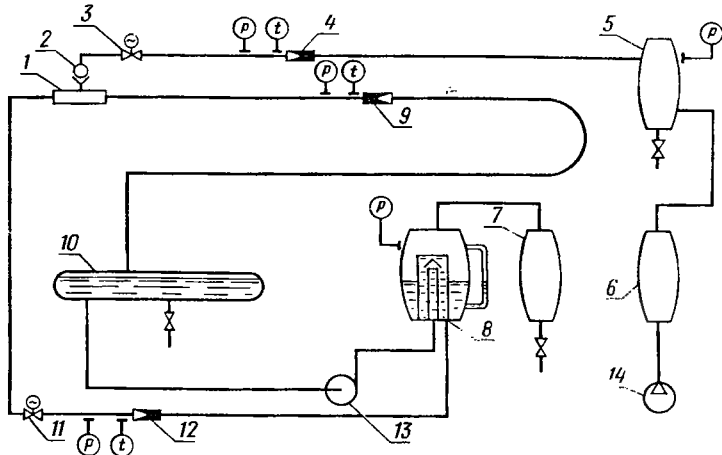


Рис. 85. Принципиальная схема образцовой газожидкостной установки

где поддерживается постоянный уровень жидкости, и воздушного ресивера 7, подается в смеситель 1. Расход жидкости регулируется задвижкой 11 и измеряется турбинным расходомером 12. Одновременно с этим компрессором 14 через ресивер 6, узел стабилизации расхода 5 и эжектор 2 в смеситель подается воздух. Расход воздуха регулируется задвижкой 3 и измеряется турбинным расходомером 4. Из смесителя газожидкостная смесь подается в испытательный участок, на котором устанавливается градуируемый или поверяемый расходомер 9, и затем сбрасывается в резервуар 10, где она сепарируется (разделяется на газ и жидкость). Давление и температуру смеси контролируют при помощи измерительных преобразователей, обозначенных на схеме  $p$  и  $t$  соответственно.

Кроме того, для измерения действительной расходной концентрации и идентификации различных режимов течения смеси (дисперсного, разделенного, пробкового) установка снабжена емкостным измерителем ее диэлектрической проницаемости.

Метрологические исследования и аттестация установки показали, что осуществляя рассмотренный принцип смешения и используя для отдельных измерений расхода жидкости и газа индивидуально аттестованные турбинные расходомеры, возможно обеспечить воспроизведение и измерение расхода газожидкостных потоков с погрешностью, не превышающей 0,8–1,0 %.

## 7.14. Измерение переменных расходов

В практике измерения переменных расходов приходится иметь дело с двумя наиболее типичными измерительными задачами:

измерение мгновенного значения расхода, что характерно для систем автоматического регулирования технологическими процессами, управления работой энергетических установок или измерений в условиях существенного систематического „тренда“ (монотонного возрастания или уменьшения) расхода;

измерение среднего (осредненного за достаточно большой промежуток времени) расхода, что характерно для систем учета или измерений пульсирующих относительно какого-либо среднего значения расходов.

Качественное (обеспечивающее приемлемую точность измерений) решение каждой из этих задач достигается правильным выбором динамических характеристик применяемых расходомеров или умением оценить дополнительную динамическую погрешность при известных динамических характеристиках расходомеров.

Наиболее полно динамические свойства любой измерительной системы (ее инерционность, обуславливающую запаздывание и искажение выходного сигнала относительно входного) описываются переходной характеристикой — зависимостью выходного сигнала от изменяющегося во времени входного при заданных параметрах измерительной системы.

В расходоизмерительной практике наиболее часто приходится иметь дело с двумя классами приборов, отличающихся видом переходной характеристики, а следовательно, и обобщенными динамическими свойствами. К первому классу относятся расходомеры, представляющие собой инерционное звено первого порядка, переходная характеристика которых описывается линейным дифференциальным уравнением первой степени

$$T \frac{dy}{dt} + y = Q(t), \quad (7.67)$$

где  $y$  — выходной сигнал (показания) расходомера, выраженный в единицах входного сигнала (расхода)  $Q(t)$ ;  $T$  — постоянная времени расходомера, с.

Величина  $T$  характеризует инерционное запаздывание выходного сигнала и определяется следующим образом. Если на вход прибора подать скачкообразный импульс расхода  $\Delta Q$ , то в соответствии с переходной характеристикой (7.67) изменение выходного сигнала  $\Delta y$  будет описываться уравнением

$$\Delta y = \Delta Q (1 - e^{-t/T}). \quad (7.68)$$

Из этого уравнения следует, что полное соответствие выходного сигнала действительному значению расхода (при  $T \neq 0$ ) наступит лишь при  $t = \infty$ , т. е. в связи с инерционностью расходомера переходный процесс (процесс установления действительного значения выходного сигнала) длится бесконечно долго.

При  $t = T$ , как следует из формулы (7.68),  $\Delta y_T = 0,632 \Delta Q$ . Следовательно, постоянная времени  $T$  соответствует времени, в течение которого изменение выходного сигнала достигает значения 0,632 от полного скачкообразного импульса входного сигнала.

Напомним еще раз, что значения выходного сигнала при этом должны быть выражены (через коэффициент преобразования или по именованной шкале) в единицах входного.

К расходомерам, переходная характеристика которых описывается линейным дифференциальным уравнением первой степени вида (7.67), относят, например, турбинные, тепловые и гидродинамические. Естественно, такое „отнесение” носит приближенный характер, однако существенно облегчает практические расчеты динамических погрешностей расходомеров.

Так, решение уравнения (7.67) для случая изменяющегося с постоянной скоростью  $a$  расхода ( $Q = at$ ) имеет вид

$$y = a(t - T) + aTe^{t/T}. \quad (7.69)$$

Следовательно, абсолютная динамическая погрешность измерения расхода в этом случае

$$\Delta y = y - at = aT(e^{-t/T} - 1), \quad (7.70)$$

а максимальное ее значение

$$\Delta y_{\max} = -aT.$$

Решение уравнения (7.67) для случая пульсирующего (относительно среднего значения  $Q_{\text{ср}}$ ) с амплитудой  $B$  и частотой  $\omega$  расхода ( $Q = Q_{\text{ср}} + B \sin \omega t$ ) имеет вид

$$y = Q_{\text{ср}} + \rho \gamma \sin(\omega t + \epsilon), \quad (7.71)$$

где  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}}$ ;  $\epsilon = \arctg -\omega T$ .

Следовательно, относительная динамическая погрешность измерения мгновенных значений пульсирующего расхода приборами, представляющими собой инерционное звено первого порядка

$$\delta_y = \frac{B}{2(Q_{\text{ср}} + B \sin \omega t)} [\gamma \sin(\omega t + \epsilon) - \sin \omega t]. \quad (7.72)$$

Максимальное значение этой погрешности

$$\delta_{y,\max} \approx \frac{B}{2Q_{\text{ср}}} \cdot \frac{\omega T}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}}. \quad (7.73)$$

И наконец, на основании формулы (7.71) относительная динамическая погрешность измерения средних (осредненных за время  $T_0$ ) значений пульсирующего расхода

$$\delta_{\bar{y}} = -\frac{B}{2Q_{\text{ср}}} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{\omega T(1 - \cos \omega T_0) + \sin \omega T_0}{\omega^2 T^2 + 1}. \quad (7.74)$$

Формулы (7.70), (7.73) и (7.74) позволяют определить расчетное значение постоянной времени  $T$  по заданным допускаемым значениям динамических погрешностей (при известных  $a$ ,  $B$ ,  $\omega$  и  $Q_{\text{ср}}$ ) или оценить



эти погрешности при известных (расчетно или экспериментально определенными) значениях  $T$ .

Величина  $T$  зависит от характеристик (массы, геометрических размеров, моментов инерции и других) подвижных элементов и линий связи измерительных преобразователей расходомеров.

Так, для турбинных расходомеров с аксиальным ротором постоянная времени определяется выражением

$$T = \frac{IS}{\rho Q} \left( \rho' \frac{J_p}{J_{\text{ж}}} + \rho \right), \quad (7.75)$$

где  $l$  — длина лопасти ротора;  $S$  — площадь живого сечения потока в зоне ротора;  $\rho, \rho'$  — плотности измеряемой среды и материала ротора соответственно;  $J_p, J_{\text{ж}}$  — моменты инерции плоского сечения ротора и сечения, заполненного жидкостью, соответственно.

Как следует из формулы (7.75), в общем случае  $T$  зависит не только от конструктивных параметров измерительных преобразователей, но и от значений входного сигнала  $Q$ .

Переходная характеристика расходомеров второго класса (к которым относят расходомеры переменного и постоянного перепада давлений) описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка

$$T_c^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_z \frac{dy}{dt} + y = Q(t), \quad (7.76)$$

где  $T_c$  характеризует время или круговой период свободных колебаний подвижной системы прибора, а постоянная времени  $T_z$  — время запаздывания прибора.

Отношение  $\beta = T_z/2T_c$  называется степенью успокоения или демпфирования прибора.

Выводы, аналогичные приведенным выше (для инерционных звеньев первого порядка), дают следующие выражения для оценки относительных динамических погрешностей расходомеров данного класса:

$$\delta' = \frac{aT_z}{Q} (e^{-bt} - 1), \quad (7.77)$$

где  $b = \frac{T_z + \sqrt{T_z^2 - T_c^2}}{2T_c^2}$  — при измерении мгновенных значений мо-

нотонно изменяющегося с постоянной скоростью  $a$  расхода;

$$\delta_y' = \frac{B}{2Q} (a - 1), \quad (7.78)$$

где  $a = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_c^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2 T_c^2}}$  — при измерении мгновенных значений пульсирующего с амплитудой  $B$  и частотой  $\omega$  расхода;

$$\delta_y' = \frac{B}{2\omega T_0 Q_{\text{cp}}} \left\{ a [\cos \epsilon' - \cos(\omega T_0 + \epsilon')] + \cos \omega T_0 - 1 \right\}, \quad (7.79)$$

где  $\epsilon' = \arctg - \frac{2\beta\omega T_c}{1 - \omega^2 T_c^2}$  — при измерении осредненных за время  $T_0$  значений пульсирующего расхода.

Как следует из приведенных формул, динамические погрешности расходомеров при известном виде переходной характеристики целиком определяются их постоянными времени ( $T$  — для линейных переходных характеристик первого порядка,  $T_c$  и  $T_3$  — для линейных переходных характеристик второго порядка). Чем меньше  $T$ ,  $T_c$  и  $T_3$ , тем лучше инерционные свойства прибора и тем меньше динамические погрешности измерения параметров переменных расходов. Обычно  $T_c$  в 3–4 раза меньше постоянной времени запаздывания  $T_3$  ( $T$ ), которая у турбинных и тепловых расходомеров составляет 0,005–0,1 с, у ротаметров — 0,5–3 с (в зависимости от массы поплавка, геометрических параметров поплавка и трубки), у электромагнитных и ультразвуковых расходомеров — 0,0001–0,001 с, у расходомеров с сужающими устройствами (в зависимости от типа и конструктивных особенностей используемых дифманометров, длин и диаметров соединительных трубок, плотности заполняющих систему дифманометров жидкостей) — 0,5–10 с.

Следовательно, расходомеры переменного перепада давлений в общем случае являются наиболее (среди других типов расходомеров) инерционными приборами и наименее пригодны для измерения параметров переменных расходов. Данное обстоятельство усугубляется и наличием у этих расходомеров дополнительной динамической погрешности, обусловленной квадратичной зависимостью расхода и перепада давлений. Действительно, квадратный корень из измеренного дифманометром среднего перепада давлений больше среднего значения корня из перепада, характеризующего осредненный за время  $T_0$  расход, т. е.

$$\sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} (p_1 - p_2) dt} > \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \sqrt{(p_1 - p_2)} dt.$$

Вследствие этого при измерении средних значений пульсирующего с амплитудой  $B$  расхода будет возникать дополнительная погрешность

$$\delta_V = \left( \sqrt{1 + \frac{B^2}{2Q_{cp}^2}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (7.80)$$

И тем не менее в практике довольно часто встречаются случаи измерения пульсирующих расходов расходомерами переменного перепада давлений. Наилучшим способом уменьшения существенных динамических погрешностей при этом является сглаживание пульсаций специальными фильтрами-успокоителями. Отметим, что этот способ пригоден и для уменьшения динамических погрешностей расходомеров любых типов. Пульсация сглаживается тем сильнее, чем больше объем системы  $V$  (включая и емкость фильтра-успокоителя) между источником пульсаций и сужающим устройством и чем больше падение давления на этом участке, соответствующее среднему расходу  $Q_{cp}$ .

Для оценки сглаживающего эффекта служит безразмерный критерий успокоения пульсаций, предложенный П.П. Кремлевским

$$k = \frac{V \omega \Delta p}{\alpha Q_{\text{ср}} p_{\text{ср}}} \quad (7.81)$$

или

$$K = 4\pi k,$$

где  $\alpha$  — показатель адиабаты измеряемой среды (в случае измерения пульсирующих расходов газов или пара).

Необходимая величина  $k$  (или  $K$ ), обеспечивающая приемлемые значения динамических погрешностей расходомеров переменного перепада давлений, зависит от характера пульсаций. Для одноцилиндровых гидравлических машин характер пульсаций определяется коэффициентом подачи  $S$ , равным отношению времени  $\tau_S$  движения потока за один период ко времени  $\tau_0$  полного периода, т. е.  $S = \tau_S / \tau_0$ .

Для многоцилиндровых гидравлических машин коэффициент неравномерности расхода  $\Theta$  равен отношению минимального мгновенного расхода  $Q_{\text{мин}}$  к максимальному мгновенному расходу  $Q_{\text{мах}}$ .

## Глава 8. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ РАСХОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

### 8.1. Образцовые расходомерные установки, принцип действия, конструктивные и метрологические особенности

Характерная особенность расходоизмерительной практики заключается в том, что воспроизведение и передача значений расхода (градуировка и поверка расходомеров) осуществляется совокупностью „несоподчиненных”, индивидуально аттестуемых технических комплексов (расходомерных установок, расходоизмерительных стендов), каждый из которых воспроизводит, по существу, поток рабочей среды (со своими физико-химическими свойствами — температурой, вязкостью, плотностью, составом), обладающий определенным (для данной установки) набором взаимосвязанных гидродинамических параметров (полем скоростей и давлений, пульсационными характеристиками и т. п.), в том числе и расходом.

В таких условиях наиболее рациональный путь обеспечения единства измерений расхода состоит в разработке и повсеместном внедрении унифицированных требований к узлам и элементам образцовых расходомерных установок, создании унифицированных методик их аттестации и оценок их реальной точности.

В общем случае любой расходоизмерительный стенд, любая расходомерная установка состоит из следующих технических систем: хранения и подготовки рабочей среды; воспроизведения потока рабочей среды; регулирования и измерения расхода.

Систему хранения и подготовки используют, в основном, в тех случаях, когда в качестве рабочих сред применяют жидкости. Она состоит

из резервуара, в котором содержится и в который сливается (во время работы установки) рабочая жидкость; устройства для ее естественной или искусственной деаэрации и обеспечения определенных (требуемых) свойств (температуры, вязкости, состава, плотности или части из них).

Система воспроизведения потока должна обеспечивать равномерный, осесимметричный, стабилизированный поток рабочей среды на заданном участке трубопровода, где монтируется градуируемый или поверяемый расходомер. С этой целью в систему включают устройства (насосы, компрессоры, напорные баки), обеспечивающие подачу рабочей среды в испытательный трубопровод, и элементы стабилизации параметров потока (поля скоростей, статического давления, расхода).

При этом естественная стабилизация поля скоростей осуществляется соответствующим выбором длины испытательного участка, технологии его изготовления и монтажа.

Система регулирования и измерения расхода должна обеспечивать „уставку” любых дискретных значений расхода в рабочем диапазоне и точное измерение этих значений абсолютным методом, т. е. в соответствии с физическим определением расхода как количества вещества, протекающего через сечение потока в единицу времени.

Конструктивные особенности указанных систем, воплощенные в различных типах образцовых расходомерных установок, характеризуются метрологическим назначением последних, свойствами рабочих сред, номенклатурой параметров расхода (средние или мгновенные значения), подлежащих воспроизведению и измерению, принятыми единицами (массовые или объемные) и диапазоном измерения.

Рассмотренные ниже типы расходомерных установок составляют парк образцовой расходоизмерительной техники страны и понимание принципов их работы, предпочтительных областей применения является „альфой и омегой” метролога-расходомерщика.

**Статические расходомерные установки.** Типовая схема статической расходомерной установки, работающей на воде или других взрывобезопасных и нетоксичных жидкостях, приведена на рис. 86. Она состоит из следующих основных узлов и элементов:

сливного резервуара 8, в котором содержится и в который сливается рабочая жидкость. Конструкцию резервуара и его объем рассчитывают таким образом, чтобы предотвратить нагревание и обеспечить естественную деаэрацию жидкости за время ее пребывания в резервуаре при длительной работе установки. Поэтому объем резервуара должен быть в 2—3 раза больше, чем суммарный объем всех остальных элементов и коммуникаций, заполняемых жидкостью во время работы установки. Кроме того, как можно большим должен быть путь жидкости в резервуаре от мест слива до мест забора ее насосом. Для этого резервуар снабжают различного рода лабиринтами, удлиняющими путь жидкости;

насоса 2, подающего жидкость из сливного резервуара 8 в напорный бак 1. Производительность насоса должна быть в 1,2—1,3 раза больше, чем верхний предел (максимальный расход) измерения установки;

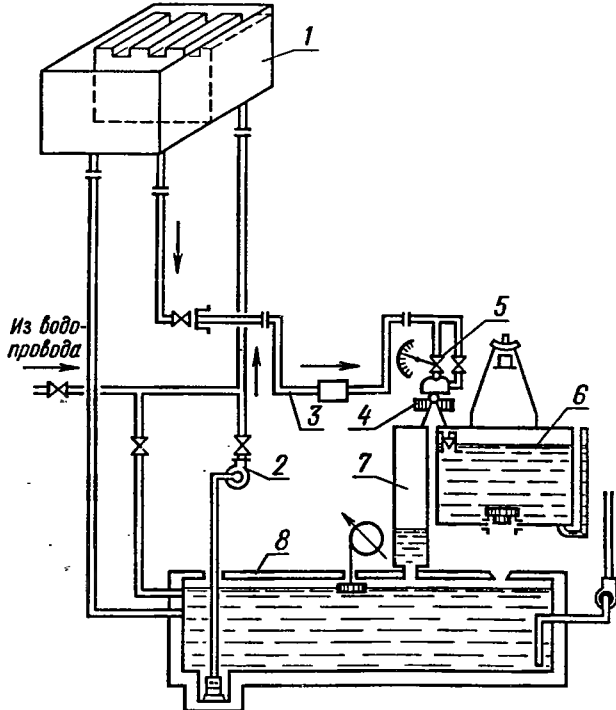


Рис. 86. Схема статической расходомерной установки

напорного бака 1, обеспечивающего постоянный напор на испытательном участке установки. Бак снабжен системой переливных лотков, поддерживающих постоянный уровень жидкости, поступающей в бак. Для обеспечения требуемого максимального расхода и статического давления на установке напорный бак следует или монтировать на соответствующей (иногда довольно значительной) высоте, или заполнять в свободном пространстве над жидкостью нейтральным газом соответствующего давления. Высоту установки бака  $H$  или давление в „газовой подушке”  $p_n$  рассчитывают (исходя из равенства сил гидравлического давления и гидравлического сопротивления коммуникаций установки) по формуле

$$H = \frac{8Q_m^2}{\pi^2 g} \sum_{i=1}^n \frac{\xi_i d_i + \lambda_i l_i}{d_i^5}, \quad (8.1)$$

где  $n$  — число участков трубопроводных коммуникаций установки с различными диаметрами  $d_i$  и длинами  $l_i$ ;  $\xi_i$  — суммарный коэффициент местных сопротивлений (задвижек, колен, входа и выхода потока), установленных на  $i$ -м участке;  $\lambda_i$  — коэффициент гидравлического трения  $i$ -го участка;  $Q_m$  — максимальный объемный расход на установке,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Конструктивные элементы напорного бака выбирают, исходя из допустимых значений колебаний гидростатического напора в нем  $c_{нд}$ .

При „высотном” (без газовой „подушки”) напорном баке рассчитывается суммарная длина переливных лотков по эмпирической формуле (справедливой для прямоугольных измерительных лотков)

$$L_{\Sigma} \approx 0,50 \frac{Q_m}{c_{нд}^{3/2}} \quad (8.2)$$

Для конструктивных расчетов напорного бака с „газовой подушкой” (рис. 87) используется выражение

$$c_{нд} = p_{п} \frac{F_c h'_c + (F_H - F_c h'_3)}{V_{г\gamma}}, \quad (8.3)$$

где  $V_{г}$  — объем „газовой подушки”  $I$ ;  $F_c$  — площадь поперечного сечения сливной камеры  $II$ ;  $F_H$  — площадь внутреннего сечения бака;  $h'_c$  — колебания уровня жидкости в сливной камере  $II$ , расчетные значения которых поддерживаются следящей уровнемерной системой УС, заблокированной с регулировочной задвижкой РЗ;  $h'_3$  — колебания уровня жидкости в свободной поверхности над сливной камерой, расчетные значения которых обеспечиваются кольцевым водосливом, образованным ее стенкой.

Варьируя, входящими в формулу (8.3) значениями  $F_c$ ,  $F_H$ ,  $V_{г}$ ,  $h'_3$  и  $h'_c$  при заданных  $p_{п}$ ,  $c_{нд}$ , добиваются оптимальных конструктивных решений.

Для уменьшения габаритных размеров напорного бака в случае, если по расчету получаются большие значения объема „газовой подушки”, целесообразно блокировать его с дополнительным газовым ресивером;

устройства 6 (см. рис. 86) для измерения количества жидкости, протекающей через установку за определенный промежуток времени. Эти устройства в зависимости от единиц измерения расхода бывают двух типов: объемные и массовые (на рис. 86) показано массовое устройство — весы). Объемное устройство (рис. 88), измеряющее количество протекшей через установку жидкости в единицах объема, представляет собой мерный бак 1, снабженный водомерной трубкой 2 и речной шкалой 4 с визиром 3. Деления на речной шкале соответствуют определенному при калибровке бака объему в данной отметке шкалы. Шкалу мерных баков градуируют (калибруют) с помощью образцовых мер вместимости (образцовых мерников) или весовым методом.

Уровень жидкости в водомерной стеклянной трубке, а следовательно, и в мерном баке устанавливают при помощи визирного устройства, исключаяющего погрешность вследствие параллакса. В ряде случаев для удобства отсчета водомерные трубки снабжаются легкими эбонитовыми поплавками.

Мерные баки могут быть изготовлены как цилиндрической, так и прямоугольной формы. Габаритные размеры бака (площадь сечения  $F_6$  и высота  $H$ ) и цена деления шкалы  $\Delta_{ш}$ , определяемая ценой деления речного указателя и конструкцией визирного устройства (нониусного или

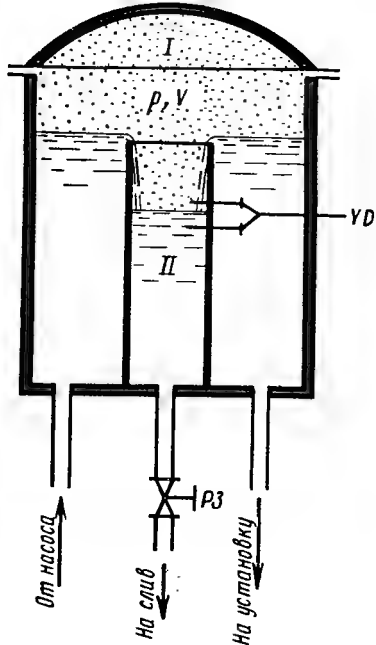


Рис. 87. Напорный бак с „газовой подушкой“

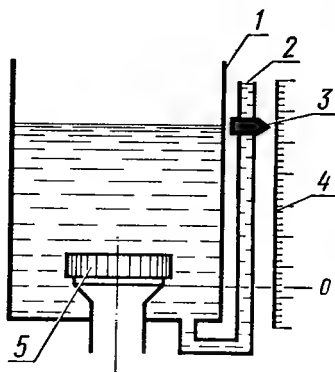


Рис. 88. Объемное устройство для измерения количества жидкости

безнониусного), должны соответствовать допускаемой погрешности отсчета  $\delta_d$ . При проектировочных расчетах мерных баков применяют следующее исходное уравнение

$$\delta_d = \frac{F \Delta_{ш}}{V_{p_{\min}}}, \quad (8.4)$$

где  $V_{p_{\min}}$  — минимальный рабочий объем мерного бака, обычно принимаемый равным половине номинального (полного) объема.

Для слива рабочей жидкости мерные баки снабжают сливными устройствами 5, в большинстве случаев являющимися грузовыми клапанами. Грузовой клапан представляет собой цилиндрический груз с резиновым торцом. Под действием собственного веса груз прижимается к седлу сливного патрубка, и резиновый торец обеспечивает герметичность клапана. Груз поднимается и опускается или с помощью ручного рычажного механизма, или с помощью электрических дистанционных устройств.

Для измерения количества рабочей жидкости в единицах массы применяют циферблатные весы или образцовые грузопоршневые весы, на платформу которых устанавливают резервуар, оборудованный смотро-

вым стеклом или автоматическим поплавковым устройством для предотвращения перелива резервуара.

Объемные устройства более просты, однако имеют ограниченную область применения (только для маловязких жидкостей) и существенно уступают по точности весовым. Так, наиболее совершенные объемные расходомерные установки имеют предельную погрешность 0,15—0,20 %, в то время как массовые — 0,05—0,10 %.

Рядом с объемным или весовым устройством устанавливают пролетный бак 7 (см. рис. 86), обеспечивающий отвод в сливной резервуар потока рабочей жидкости в промежутке между измерениями ее количества. Иногда вместо пролетного бака устанавливают второй мерный бак или весовое устройство. В этом случае установка может работать непрерывно: пока один бак заполняется, на другом отсчитывают показания, а затем этот бак опорожняется;

устройства 5 (см. рис. 86), регулирующего расход на установке.

В качестве задатчика требуемого значения расхода на установках могут применяться различные задвижки и вентили. О предварительном значении задаваемого расхода (точное определяется по показаниям установки) судят или по показаниям установленного в систему регулирования расходомера, или по перепаду давления на самом устройстве. Первый способ дорог и требует длинных прямых участков; второй — сложен и весьма груб в связи с нелинейностью и изменениями характеристик обычных задвижек и вентилях. Поэтому в последнее время для регулирования расхода на высокоточных расходомерных установках, оборудованных системой поддержания и стабилизации гидростатического напора, стали применять специальные регулировочные вентили, обеспечивающие линейную пропорциональность между ходом их рабочего органа и расходом протекающей жидкости.

В качестве таких устройств используются либо задвижки с перфорированными втулками, либо игольчатые вентили с логарифмической формой регулировочной иглы.

„Пропорциональные” регулировочные устройства (обладающие устойчивой линейной зависимостью между расходом и перемещением регулирующего органа при постоянном статическом напоре в системе) могут одновременно являться и задатчиками и достаточно точными измерителями расхода, что обуславливает перспективность их применения в образцовых расходоизмерительных системах;

перекидного устройства 4 (см. рис. 86), направляющего поток рабочей жидкости или в мерный бак (резервуар весового устройства) в начале опыта, или в пролетный бак при окончании опыта (наливе мерного бака до требуемой отметки шкалы). Для „переброски” потока могут применяться перекидные устройства различных типов, например, поворотные трехходовые краны, пневматические или электрические клапаны, гибкие рукава, поворотные разделительные коробки. Причем, наибольшее распространение в отечественных расходомерных установках получил последний тип перекидных устройств — поворотные разделительные коробки (рис. 89). Перекидное устройство работает следующим образом.



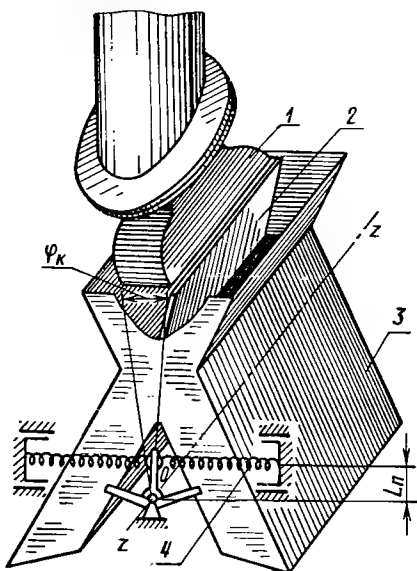


Рис. 89. Подвижной разделительный короб (перекидное устройство)

Поток жидкости из трубопровода по левому рукаву короба 3 поступает в мерный бак или весовой резервуар установки. При „переброске” потока короб с помощью приводного механизма 4 поворачивается вокруг оси  $O$ , перерезает поток жидкости перегородкой 2 и направляет его по правому рукаву в пролетный бак. При повороте короба воздействует на механические прерыватели (реле), которые подают импульсы на начало и конец счета времени прибором, измеряющим длительность налива жидкости в мерный бак или весовой резервуар. Для уменьшения продолжительности поворота короба струю жидкости на выходе из трубопровода деформируют в узкую прямоугольную струю насадком 1.

Одной из основных характеристик перекидного устройства, влияющей на точность образцовых расходомерных установок, является разновременность срабатывания перекидного устройства  $\Delta t$  при „переброске” потока из мерного бака в пролетный и наоборот — из пролетного бака в мерный. Чем меньше  $\Delta t$ , тем меньше влияние на точность установки переходных процессов, происходящих при повороте короба.

Зависимость дополнительной систематической погрешности установок  $\delta_p$  от  $\Delta t$  для различных типов приводных механизмов, обеспечивающих поворот короба, приведена ниже:

| Привод                           | Зависимость $\delta_p$ от $\Delta t$                                |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| С падающим грузом                | $k_1 \Delta t^3$                                                    |
| Электромагнитный или соленоидный | $k_2 \left( \Delta t - \frac{\text{sh } k_3 \Delta t}{k_3} \right)$ |
| Пружинный                        | $k_2 \left( \frac{\sin k_4 \Delta t}{k_4} - \Delta t \right)$       |

$$\text{Здесь: } k_1 = \frac{L_H M_{\Pi}}{6 J b_H (T + t)}; \quad k_2 = \frac{1}{T + t};$$

$$k_3 = \sqrt{\frac{L_H P_H}{J \varphi_K}}; \quad k_4 = L_{\Pi} \sqrt{\frac{\pi c}{J}};$$

$T$  — продолжительность налива жидкости в мерный бак;  $t$  — средняя продолжительность поворота короба;  $P_H$  — усилие, развиваемое электромагнитом или со-

пенлоном при начальном положении сердечника;  $n$  — число пружин в пружинном приводе;  $c$  — жесткость пружины;  $b_n$  — размер выходного сечения насадки  $I$  (см. рис. 67) в плоскости поворота короба;  $J$  — момент инерции всех вращающихся относительно оси  $O$  деталей перекидного устройства, включая и жидкость, находящуюся в коробе;  $M_{\Pi}$  — момент силы, развиваемой приводным механизмом, относительно оси вращения;  $L_n, L_{\Pi}, \varphi_K$  — см. рис. 89.

Для уменьшения величины  $\Delta t$ , а следовательно, и вызываемой ею погрешности, обычно применяют быстродействующие приводные механизмы, обеспечивающие срабатывание (поворот) перекидного устройства за 0,01–0,02 с;

испытательного участка 3 (см. рис. 86), на котором воспроизводят равномерный осесимметричный и стабилизированный поток рабочей жидкости, и на котором устанавливают градуируемые или поверяемые расходомеры. Длина испытательного участка должна быть, как правило, не менее 100 диаметров трубопровода, из которого он монтируется. непосредственно перед испытательным участком подводящий трубопровод не должен иметь сложных пространственных колен, способствующих винтообразному движению потока. Регулирующее устройство следует устанавливать на выходном конце испытательного участка, чтобы при всех рабочих режимах сечение испытательного участка было полностью заполнено рабочей жидкостью и для уменьшения деформаций потока на входе в испытательный участок;

прибора для измерения продолжительности налива рабочей жидкости в мерный бак или резервуар весового устройства. Обычно для измерения длительности налива применяют точные электрические хронометры, электронные секундомеры или счетчики импульсов.

В состав расходомерных установок должны также входить средства измерений статического давления на испытательном участке и физико-химических свойств рабочей жидкости.

Основная особенность статических расходомерных установок (определяющая их название) состоит в том, что процессы воспроизведения потока рабочей жидкости и измерения ее расхода на этих установках как бы „разорваны” во времени. Это значит, что расход измеряется лишь после того, как определенное количество рабочей жидкости протекло через испытательный участок и заполнило определенный объем мерного бака. Обычно, для уменьшения погрешностей, связанных с осреднением значений расхода, рабочий объем мерного бака выбирают таким, чтобы время его заполнения при максимальном расходе было больше 40–60 с.

Вследствие отмеченного статические расходомерные установки, являясь на сегодняшний день наиболее точными средствами градуировки и поверки расходомеров (статическая весовая установка с предельной погрешностью 0,05 % принята в настоящее время в качестве государственного первичного эталона единицы расхода), могут воспроизводить и измерять лишь осредненные за достаточно большой промежуток времени значения расхода.

**Динамические расходомерные установки.** В отличие от статических в динамических расходомерных установках процессы воспроизведения

потока и измерения его расхода совмещены во времени, осреднение количества рабочей среды осуществляется за достаточно малые промежутки времени. Вследствие этого данные установки могут использоваться (в основном и используются) для воспроизведения и измерения мгновенных значений расхода.

Естественно, малое время осреднения существенно снижает требования к стабильности расхода на испытательном участке. Поэтому, как правило, динамические установки работают без системы стабилизации напора. Принцип действия динамических установок (рис. 90) заключается

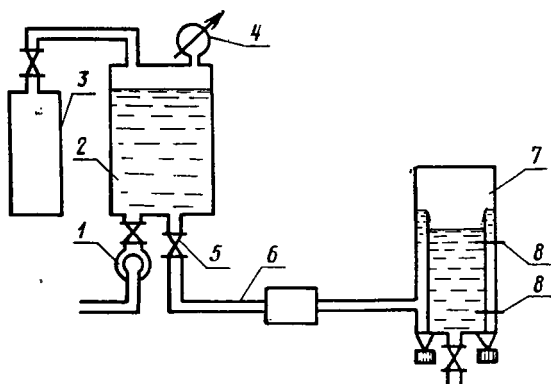


Рис. 90. Схема динамической расходомерной установки

в следующем. Рабочая жидкость насосом 1 закачивается в напорный бак 2, в котором пневматической системой 3 (компрессор или баллон с нейтральным газом) создается определенное статическое давление, контролируемое манометром 4. В процессе опыта открывается вентиль 5 и рабочая жидкость выдавливается из напорного бака через испытательный участок 6 в измерительный бак 7. Измерительный бак оборудован датчиками уровня 8 (объемные динамические установки) или выставлен на тензометрических датчиках (весовые динамические установки). В первом случае, измеряя объем порции поступающей жидкости между двумя уровнемерами и соответствующий промежуток времени, определяют дискретные значения расхода. Во втором случае можно получить непрерывную запись значений весового количества наливаемой жидкости, соответствующую запись времени и определить непрерывные (аналоговые) значения расхода. Существуют и уровнемеры (например, ультразвуковые), позволяющие непрерывно измерять объем наливаемой в измерительный бак жидкости.

Динамические установки просты по конструкции (нет систем стабилизации напора, перекидных устройств), позволяют воспроизводить и измерять мгновенные (точнее осредненные за малый промежуток времени) значения расхода, однако точность этих установок существенно ни-

же точности статических. Кроме ограниченной точности существующих уровнемеров и тензометрических датчиков это обуславливается и рядом специфических погрешностей, вызываемых динамическими свойствами измерительных систем, колебаниями уровня и реакцией струи жидкости при заполнении измерительного бака и, самое главное, „разбалансом” измеренного установкой и реально протекавшего через испытательный участок количества рабочей жидкости. Поясним последнее. На рис. 91 схематически показан измерительный бак динамической расходомерной

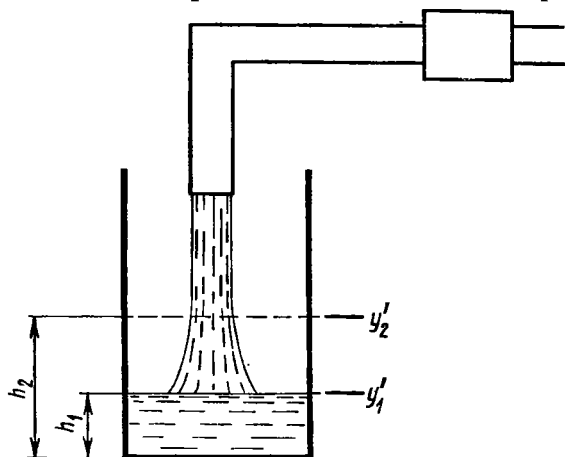


Рис. 91. Схема заполнения измерительного бака

установки, наполняемый из сливной трубы рабочей жидкостью. Измерительный бак „начинает работать”, т. е. уровень заполняющей его жидкости начинает превышать нулевую отметку в то время, когда через любое сечение испытательного участка уже протекает некоторое количество жидкости, заполняющее трубопровод от данного сечения до выходной кромки сливной трубы и находящееся в свободно падающей от выходной кромки до нулевой отметки бака струе. Обозначим это количество  $V_0$ . Когда уровень жидкости в баке поднимется до отметки  $h_1$  и первый уровнемер  $y_1$  „выдаст” сигнал, соответствующий измеренному количеству  $V_1$ , через испытательный участок будет протекать количество жидкости, равное  $V_1 + V_0'$ . Причем,  $V_0'$  будет меньше  $V_0$  на объем  $\Delta V_1$  части струи, ограниченной отрезком  $h_1$ . При этом измеренный расход  $Q = V_1/t_1$ , где  $t_1$  — продолжительность заполнения бака до высоты  $h_1$ , в то время как действительный расход

$$Q_d = \frac{V_1 + V_0' - V_0}{t_1} = Q - \frac{\Delta V_1}{t_1}.$$

При срабатывании второго уровнемера  $y_2$  на отметке  $h_2$  измеренное количество жидкости будет отличаться от действительного на значение объема части струи, ограниченной отрезком  $(h_2 - h_1)$  и т. д.

Для компенсации данной погрешности вводят соответствующие расчетные поправки.

Отмеченные особенности динамических установок (малое время осреднения, совмещение процессов воспроизведения и измерения расхода) не позволяют свести их погрешности к уровню менее 0,2—0,3 %.

**Специальные установки для воспроизведения больших значений расхода.** Создание образцовых расходомерных установок для воспроизведения больших (от тысячи до десятков тысяч  $\text{м}^3/\text{ч}$ ) значений расхода по рассмотренным выше „классическим” схемам требует больших капиталовложений, связанных, в основном, с разработкой и изготовлением соответствующей измерительной аппаратуры, больших производственных площадей, большого времени на аттестацию. Поэтому данные установки целесообразно создавать по иной принципиальной схеме (рис. 92), получившей в последние годы (благодаря усилиям метрологических ин-

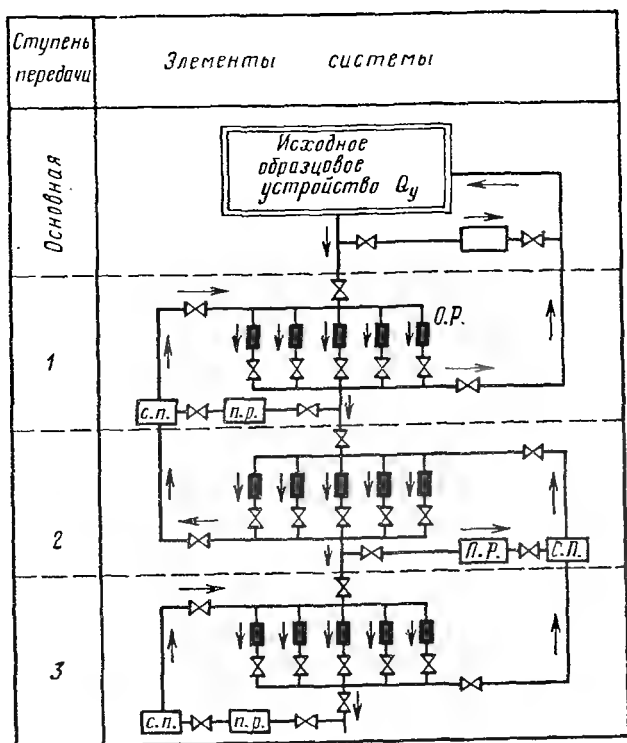


Рис. 92. Принципиальная схема системы для воспроизведения больших значений расхода:

ОР — образцовый расходомер; ПР — поверяемый расходомер; СП — система подачи жидкости

ституты и приборостроительных организаций) достаточно широкое распространение в отечественной расходоизмерительной практике.

В качестве образцовых средств измерения расхода на этих установках используют серийно изготавливаемые расходомеры (электромагнитные, турбинные и другие), аттестованные непосредственно на рабочих местах (на испытательных участках установки). Образцовые расходомеры устанавливаются в  $n$  параллельных трубопроводах, ответвленных от основного, на котором воспроизводится измеряемый поток. Верхние пределы измерений образцовых расходомеров  $Q_{\text{ив}}$  и число параллельных трубопроводов выбирают таким образом, чтобы возможно было обеспечить воспроизведение и измерение определенных дискретных значений расхода (обусловленных числом и значением расчетных точек в диапазоне измерений градуируемых или поверяемых на установке расходомеров), используя образцовые приборы только на верхних пределах измерений (т. е. с максимальной точностью). Например, воспроизведение любых значений расхода в диапазоне  $100-1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  через каждые 10 % верхнего предела возможно осуществить параллельной установкой шести расходомеров с  $Q_{\text{ив}}$ , равными соответственно 100; 100; 200; 200; 200; 200  $\text{м}^3/\text{ч}$ , или пяти расходомеров с  $Q_{\text{ив}}$ , равными 100; 200; 200; 200; 300  $\text{м}^3/\text{ч}$  и т. д.

Оптимальное соотношение между  $Q_{\text{ив}}$  и  $n$  выбирают из экономических соображений и наличия исходных средств аттестации и градуировки образцовых расходомеров. Причем образцовые расходомеры можно также градуировать и аттестовывать на установке с  $m$  параллельными трубопроводами. В этом случае наибольшее воспроизводимое такой двухступенчатой системой значение расхода будет в  $m \cdot n$  раз больше верхнего предела измерений исходной установки, на которой градуируют образцовые расходомеры первой ступени. Создавая двух-, трех-,  $k$ -ступенчатые системы, возможно получить сколь угодно большие значения воспроизводимых расходов. Это основное преимущество подобных расходоизмерительных систем, обуславливающих перспективность их практического использования.

Вторым достоинством таких систем является свойство автокомпенсации случайных погрешностей используемых расходомеров, вследствие которого случайная погрешность всей системы с  $n$  параллельно работающими расходомерами в  $\sqrt{n}$  раз меньше относительной случайной погрешности каждого из них. Именно это обстоятельство позволяет использовать в описанных образцовых установках промышленные расходомеры ограниченной точности.

С целью аттестации расходомеров непосредственно на рабочих местах установки на большие расходы целесообразно гидравлически объединять с исходными образцовыми установками, обеспечивающими градуировку и аттестацию расходомеров первой ступени.

**Специальные установки для воспроизведения сверхмалых (капельных) расходов.** Принципиальная схема капельно-жидкостной установки приведена на рис. 93. Установка работает следующим образом. Рабочая жидкость из бачка 1, оборудованного системой стабилизации напора, через испытательный участок 2, на котором монтируется градуируемый или поверяемый расходомер 3, поступает в капельницу 4, формирующую

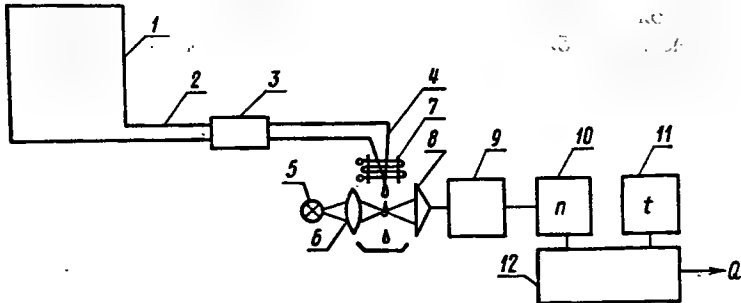


Рис. 93. Принципиальная схема капельно-жидкостной установки

капли определенной формы и объема. Количество вытекающих из капельницы капель фиксирует оптическая система, состоящая из источника света 5, фокусирующей системы 6 и фотодиода 8. Капли перекрывают световой поток в фокусе оптической системы, что обеспечивает его максимальное ослабление. Напряжение с фотодиода через преобразователь 9 подается на счетчик 10 числа импульсов, пропорциональных количеству капель. Счетчик импульсов заблокирован с системой отсчета времени 11. Сигналы от счетчика импульсов (количества капель) и системы отсчета времени подаются в автоматизированное устройство 12, которое подсчитывает расход жидкости через установку по формуле

$$Q = \frac{nV_K}{t}, \quad (8.5)$$

где  $n$  — количество капель;  $V_K$  — объем капли;  $t$  — время, в течение которого эти  $n$  капель были зафиксированы счетчиком.

Управление размерами и объемом капель, а также стабилизация этих параметров обеспечивается электростатическим полем, создаваемым специальными пластинами 7, расположенными на конце насадки для капельобразования.

Изменяя управляющее напряжение на пластинах 7, можно изменять объем капель, а следовательно, и расход жидкости, протекающей через установку. При этом система стабилизации напора поддерживает постоянную скорость отрыва капель от наконечника.

Основными составляющими суммарной погрешности капельно-жидкостных установок рассмотренного типа являются: погрешность счета капель за измеряемое время и погрешность вследствие непостоянства объема капель, вызываемого колебаниями управляющего напряжения и изменениями физико-химических свойств рабочей жидкости.

Погрешность счета капель не превышает  $\pm 1$  капли, и ее относительное значение может быть сведено к требуемому выбором числа или суммарного количества отсчитываемых капель.

Неподстоянием объема капле также можно свести к достаточно малому значению стабилизацией управляющего напряжения и термостатированием установки.

При соблюдении указанных условий можно „уложить” предельную погрешность капельно-жидкостных установок в  $\pm (0,2-0,3 \%)$ .

**Образцовые установки для воспроизведения расхода газообразных сред.** Следует отметить, что до последнего времени промышленность и приборостроение не располагали достаточно точными и эффективными средствами градуировки и поверки расходомеров газа. Разработанные ВНИИР образцовые грузокольцевые и трубопоршневые „газомерные” установки существенно восполняют этот пробел.

Эти установки просты, надежны, обладают высокой точностью (трубопоршневая установка принята в качестве государственного эталона расхода газов), широким диапазоном воспроизводимых расходов.

Схема грузокольцевой расходомерной установки показана на рис. 94. При вращении барабана 1 под действием груза 3 жидкостной сегмент 2, протекая по винтовому каналу барабана, вытесняет воздух в подающий трубопровод 4 и далее на испытательный участок, где монтируется градуируемый (поверяемый) расходомер.

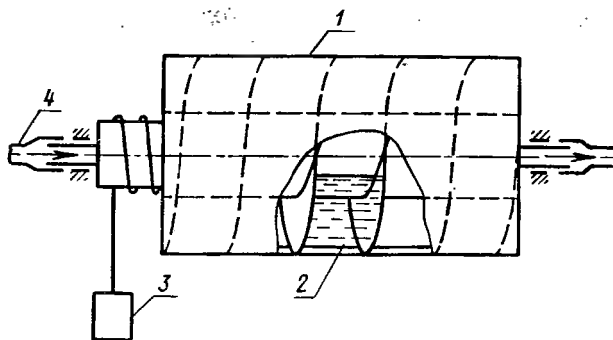


Рис. 94. Схема грузокольцевой расходомерной установки

Расход газа через установку определяется соотношением

$$Q = \varphi V_0, \quad (8.6)$$

где  $\varphi$  — угловая скорость вращения барабана, измеряемая с достаточно высокой точностью существующими средствами измерения угловых скоростей;  $V_0$  — объем кольцевого канала, соответствующий повороту на  $1^\circ$ , определяемый в процессе калибровки винтового канала.

Расход газа регулирует вентилем. Диапазон измерений может быть изменен изменением массы груза 3.

Статическое давление газа на испытательном участке определяется лишь весом груза и при неизменности его автоматически поддерживается постоянным при любых расходах.



Погрешность воспроизведения (измерения) расхода грузокольцевой установкой обуславливается погрешностями калибровки винтового канала, измерения угловой скорости вращения барабана, колебаниями размеров поперечного сечения канала, непостоянством коэффициента трения в подшипниках и сальниках вращающегося барабана, протечками газа через сальниковые уплотнения.

При грамотном конструировании, хорошем изготовлении и тщательной аттестации грузокольцевых установок их предельная погрешность может быть сведена до уровня  $\pm (0,15-0,25) \%$ . Применение грузокольцевых установок технически целесообразно для воспроизведения относительно небольших значений расхода газа. В настоящее время их широко применяют для градуировки и поверки „газовых” ротаметров.

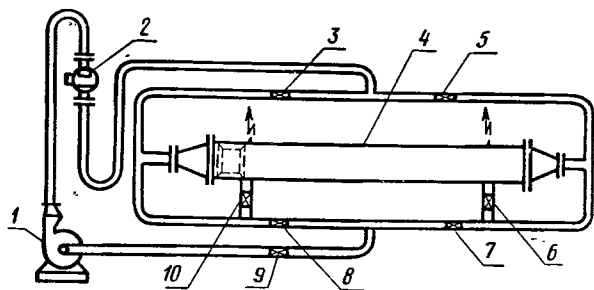


Рис. 95. Схема трубопоршневой расходомерной установки непрерывного действия

Большие значения расхода газа воспроизводят с помощью трубопоршневых расходомерных установок (рис. 95). Установка представляет собой замкнутую кольцевую систему, основным элементом которой является калиброванная труба 4 с помещенным внутрь нее поршнем. Нагнетаемый воздуходувкой 1 в систему воздух проходит градуируемый или поверяемый расходомер 2, устанавливаемый на восходящем участке трубной обвязки, и, попадая в трубу 4, перемещает поршень, который при прохождении мимо первого по ходу детектора (магнито-язычкового реле) включает электронный секундомер. Когда поршень пройдет зону срабатывания второго детектора, секундомер отключается. В этот момент происходит автоматическое переключение отсекающих 3, 5—10, и воздух начинает поступать в трубу с другого торца, заставляя поршень перемещаться в обратном направлении. Таким образом осуществляется непрерывная работа установки. Воспроизводимый расход определяется объемом калиброванного участка трубы 4 и временем прохождения этого участка поршнем. Калиброванный участок по длине трубы располагают таким образом, чтобы движение поршня на этом участке было установившимся, равномерным (без разгона и торможения). Для обеспечения устойчивой работы установки и уменьшения длин начального („разгонного”) и конечного („тормозного”) участков движения поршня

применяют; уплотненные трубопоршневые системы с 1,5–2-миллиметровыми радиальными зазорами между стенками трубы и поршнем, что обуславливает протечки газа через зазоры и устойчивый гидродинамический характер трения в системе. Дополнительные погрешности, связанные с протечками газа, при этом могут быть оценены и скомпенсированы соответствующими поправками, значения которых определяются в процессе аттестации установки.

Пределы погрешности наиболее совершенных трубопоршневых расходомерных установок не превосходят 0,1–0,2 %.

## 8.2. Основы метрологической аттестации образцовых расходомерных установок

Градуировочные и поверочные расходомерные установки подлежат обязательной метрологической аттестации, при которой определяют работоспособность всех узлов и элементов установки; герметичность мерных баков или весового резервуара; максимальный расход; предельную погрешность; характер потока на испытательном участке установки.

Кроме того, в объемных установках проверяют постоянство нулевой отметки шкалы мерных баков и устанавливают необходимую продолжительность выдержки после опорожнения.

Для определения нормальной работоспособности всех узлов и элементов установку предварительно эксплуатируют на максимальном расходе в течение 120–150 ч.

Герметичность мерных баков или весового резервуара проверяют следующим образом. Баки наполняют до полного объема рабочей жидкостью и после трехчасовой выдержки вновь измеряют количество заливной жидкости.

Если результаты повторного измерения совпадают (в пределах точности отсчета) с первоначальными, мерные баки или весовой резервуар считают герметичными.

Максимальный расход на установке оценивают, исходя из минимально допустимой продолжительности  $T_{\min}$  налива мерных баков или весового резервуара. Как уже отмечалось выше, для того, чтобы уменьшить погрешности, вносимые в результат измерения расхода на установке нестабильностью срабатывания контактных реле, включающих и выключающих измеритель времени; разновременностью срабатывания перекидных устройств и другими причинами,  $T_{\min}$  для статических расходомерных установок принимают равным 40–60 с.

Тогда максимальный расход на установке

$$Q_{\max} = \frac{V_p}{T_{\min}} \quad (8.7)$$

или

$$M_{\max} = \rho \frac{V_p}{T_{\min}}, \quad (8.8)$$

где  $V_p$  — рабочий объем мерных баков или весового резервуара.

Минимальный расход на установке  $Q_{\min}$  определяется по формуле производительностью установки, требуемой быстротой градуировки или поверки расходомеров. Он обычно составляет  $1/10$  от  $Q_{\max}$ .

Предельную погрешность установки рассчитывают по формуле (справедливой для статистического суммирования составляющих погрешностей, равномерно распределенных в пределах своих максимальных оцененных значений)

$$\delta_{\text{пр}} = 1,7 \sqrt{\delta_V^2 + \delta_t^2 + \sum_i \delta_{ci}^2}, \quad (P = 0,997) \quad (8.9)$$

где  $\delta_V$  — погрешность измерения количества рабочей среды на установке;  $\delta_t$  — погрешность измерения продолжительности опыта;  $\delta_{ci}$  — дополнительные систематические погрешности измерения расхода на установке, обусловленные ее конструктивными особенностями (например, разновременностью срабатывания перекидных устройств), изменениями параметров окружающей и рабочей сред (например, температурные деформации измерительных баков).

Таким образом, в основе косвенных (расчетных) оценок погрешности измерения расхода на образцовых расходомерных установках при их метрологической аттестации лежит поэлементный анализ возможных причин, источников и факторов, обуславливающих погрешности измерений. При этом основная сложность (придающая творческий, исследовательский характер процессу аттестации) заключается не столько в самих оценках погрешности и ее составляющих, сколько в физически и метрологически обоснованном выявлении всех факторов, „значимо” влияющих на результаты измерений.

Существенно на „подконтрольную” работу расходомерных установок влияют статистические параметры воспроизводимого на ее испытательном участке потока. К таким параметрам относятся:

функция систематического изменения расхода во времени  $m(t)$ ; максимальная амплитуда и частота периодических колебаний статического напора в гидравлической системе установки;

средние квадратические отклонения турбулентных пульсаций расхода  $\sigma_Q$ ;

искажения эпюры распределения осредненных скоростей по сечению потока.

Именно эти параметры, характеризующие „качество” воспроизводимого на установке потока, не позволяют обеспечить полной метрологической взаимозаменяемости образцовых расходомерных установок и существенно влияют на точность градуировки и поверки расходомеров.

Систематические изменения расхода  $m(t)$  обуславливаются постепенным нагревом рабочей жидкости в процессе работы установки развитием вихреобразований в зоне установки местных сопротивлений, аэрацией и т. п. Влияние этих факторов в наибольшей степени проявляется на максимальном расходе, вследствие этого величину  $m(t)$  оценивают на верхнем пределе измерений.

Определение  $m(t)$  сводится к многократным измерениям расхода в различные (фиксированные) моменты времени (например, с помощью

смонтированного на установке расходомера) при неизменном положении регулирующего органа, проверке гипотезы (по критерию Стьюдента) о наличии систематического временного „тренда” в измеренных значениях расхода и оценке методом наименьших квадратов функции  $m(t)$  в случае, если гипотеза о наличии (существенности) систематического „тренда” подтвердилась.

Характеристики колебаний статического напора в гидравлической системе установки оценивают по результатам экспериментального исследования системы стабилизации напора.

Среднее квадратическое отклонение турбулентных пульсаций расхода может оцениваться либо по показаниям малоинерционных расходомеров, смонтированных на установке, либо по результатам измерения расхода и перепада давления  $\Delta p$  на испытательном участке (длиной  $L$  и радиусом  $R$ ) по формуле

$$\frac{\sigma_Q}{Q} \approx 8,6 \left( \frac{R^5}{LQ^2} \Delta p \right)^{0,55}. \quad (8.10)$$

Допустимое значение пульсаций расхода определяют по динамическим свойствам расходомеров, для градуировки и поверки которых предназначена установка.

Эпюру скоростей по сечению испытательного участка снимают при помощи трубок скоростного напора (трубок Пито). Допустимые искажения эпюры (ее несимметричность) также определяют, исходя из назначения установок и конструктивных особенностей монтируемых расходомеров.

### 8.3. Основы градуировки и поверки расходомеров

**Основы градуировки расходомеров.** Между измеряемым расходом  $Q(M)$  и показаниями  $П$  любого расходомера существует зависимость, характеризующая его уравнением измерений (статической характеристикой преобразования). В общем случае коэффициенты, входящие в эти уравнения, зависят как от конструктивных параметров расходомеров, так и от физико-химических свойств измеряемой среды. В подавляющем большинстве случаев рассчитать с достаточной для практических целей точностью значения этих коэффициентов чисто аналитическим путем невозможно. Кроме того, из-за отсутствия полного геометрического подобия элементов эти коэффициенты различны для разных расходомеров одной конструкции и одного типоразмера (исключение составляют лишь стандартизованные типы расходомеров переменного перепада давления, для которых геометрическое подобие, а следовательно, и возможность косвенной градуировки обеспечивается стандартизованной технологией изготовления и производственного контроля сужающих устройств). Поэтому большинство существующих расходомеров индивидуально градуируют с помощью описанных выше расходомерных установок.

Целью градуировки является количественное определение зависимости между измеряемым расходом и показаниями расходомера и пред-

ставление этой зависимости в виде уравнения, таблицы, графика или оцифрованных в единицах расхода делений шкалы градуируемого расходомера.

Процесс градуировки состоит в следующем: регулировочным устройством устанавливают определенный расход на установке, затем одновременно точно измеряют расход на установке и снимают показания градуируемого расходомера. Эту операцию повторяют многократно на различных расходах.

Имея совокупность определенных на установке расходов и соответствующих им показаний расходомера, можно определить искомую градуировочную зависимость и аппроксимировать значения расхода на всю шкалу прибора и весь диапазон измерений.

Поскольку вид градуировочной зависимости, как правило, известен, он характеризуется уравнением измерений расходомера; необходимые для количественной оценки и аппроксимации расчеты проводят способом наименьших квадратов.

Число расходов, на которых градуируют расходомер, обычно выбирают равным 10 (через каждые 10 % верхнего предела измерений расходомера). В этом случае предельная погрешность полученной градуировочной зависимости

$$\delta_T = \pm 3 \sqrt{\frac{1}{10-n} \sum_{i=1}^{10} \left[ \frac{f(\Pi_i) - Q_i}{Q_i} \right]^2 + \frac{\delta_y^2}{3}}, \quad (P = 0,997) \quad (8.11)$$

где  $n$  — число неизвестных коэффициентов, которые определялись при градуировке;  $\delta_y$  — погрешность градуировочной установки, оцененная при ее метрологической аттестации.

Для индивидуально градуируемых приборов (каковыми являются расходомеры) процедура градуировки (нахождение числа градуировочных точек, их номинальных значений, числа измерений на каждой точке, характеристик средств градуировки) должна регламентироваться в нормативно-технической документации на эти приборы.

**Основы поверки расходомеров.** Существуют два технологических процесса поверки расходомеров: поверка на образцовых расходомерных установках и поэлементная поверка.

На образцовых расходомерных установках осуществляется поверка индивидуально градуируемых расходомеров. Процесс поверки при этом сводится к сравнению расхода  $Q_d$ , измеренного с помощью установки, с показаниями расходомера (при том же расходе)  $Q_p$ , определенными по шкале прибора или по его градуировочной зависимости  $f(\Pi)$ .

Если значение разности  $(Q - Q_d)$  на всех поверяемых точках (поверочных значениях расхода) не превосходит определенного нормированного классом точности или предельной относительной погрешностью расходомера значения, результаты поверки считают положительными, а прибор — пригодным для использования. В противном случае, прибор необходимо переградуировать.

Процедура и методика проведения поверочных операций (определение числа и значения поверяемых точек, числа измерений на каждой точ-

ке, точностью средств поверки и др.) определяются поверочной схемой, точностью поверяемого расходомера, допустимыми вероятностями брака поверки (вероятностью забраковать заведомо годный прибор и вероятностью пропустить негодный прибор) и регламентируются в соответствующей нормативно-технической документации.

Позлементный способ применяют при поверке расходомеров переменного перепада давления. При этом методе образцовые расходомерные установки не нужны; сужающее устройство и дифманометр поверяют отдельно.

При поверке сужающего устройства необходимо:

проверить правильность расчета сужающего устройства

убедившись в правильности расчета, измерить диаметр сужающего устройства. Диаметр цилиндрической части отверстия диафрагмы измеряют не менее, чем в четырех диаметральных направлениях, а сопла и сопла Вентури — в двух поперечных сечениях и не менее, чем в четырех диаметральных направлениях. Погрешность измерений не должна превышать  $1/3$  допуска на диаметр;

проверить соответствие действительного (измеренного) диаметра сужающего устройства расчетному;

установить нормальное техническое состояние сужающего устройства, т. е. проверить остроту входной кромки диафрагмы или геометрию профильной части отверстия сопла, плоскостность входного торца и чистоту поверхностей сужающего устройства и установить отсутствие заусенцев и зазубрин на кромках входного отверстия.

Для поверки дифманометров используют различные образцовые манометрические устройства и установки,

### Контрольный вопрос № 16

На весовой расходомерной установке поверяли электромагнитный расходомер. Поверку проводили на воде. При этом было принято, что плотность воды постоянна и равна  $0,9997 \text{ г/см}^3$ . По результатам поверки расходомер был забракован, так как показания установки превышали показания прибора на недопустимо большое значение. После поверки было обнаружено, что вода на установке в процессе опыта сильно насыщалась воздухом.

Необходимо ли повторно поверять прибор или можно оставить в силе выводы о его метрологической негодности?

Если Вы решите, что необходимо повторно поверить расходомер, загляните на с. 228, если же Вы решите, что в этом нет необходимости — см. с. 237.

## Глава 9. СЧЕТЧИКИ КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТЕЙ

## 9.1. Основные характеристики счетчиков

Приборы для измерения количества вещества, т. е. для измерения суммарного объема или массы вещества, протекающего по трубопроводу за какой-либо отрезок времени (час, сутки и т. д.), называются счетчиками.

В последнее время в связи с появлением интегрирующих устройств у расходомеров и специальных расходомерных приставок у счетчиков между этими приборами не делают принципиального различия и даже объединяют их в одну общую группу приборов — расходомеры. Однако эти приборы имеют и свои специфические различия, отражающиеся в подходе к определению и нормированию основных технических и метрологических характеристик.

В современном промышленном производстве применяют счетчики, отличающиеся друг от друга назначением, принципом действия и конструкцией. Для оценки и сравнения различных конструкций и модификаций счетчиков как измерительных устройств и определения реальной точности измерения количества нормируются следующие характеристики:

калибр — диаметр условного прохода входного патрубка счетчика в миллиметрах;

относительная погрешность показаний в процентах — разность между показаниями счетчика  $V_c$  и действительным количеством вещества  $V_d$ , прошедшим через счетчик  $\delta = (V_c - V_d) / V_d \cdot 100$ ;

потеря напора — разность давлений, определенная по показаниям манометров во входном и выходном патрубках счетчиков, обусловленная гидравлическим и механическим сопротивлениями в его механизме;

нижний предел измерений — наименьший часовой расход, при котором относительная погрешность показаний счетчика не выходит за пределы допускаемых значений;

верхний предел измерений — наибольший часовой расход, при котором погрешность показаний и потеря напора не выходят за пределы установленных допусков (работа счетчиков на верхнем пределе допускается только при кратковременных пиковых нагрузках — в общей сложности не более 1 ч в сутки);

номинальный расход — наибольший часовой расход, при котором погрешность показаний не выходит за пределы допускаемых значений, а потеря напора при этом расходе не создает в приборе усилий, приводящих к быстрому износу трущихся частей и деталей;

порог чувствительности — наименьший часовой расход, при котором чувствительный элемент прибора приобретает установившееся движение, а счетчик начинает „давать” показания с любой сколь угодно большой погрешностью. Порог чувствительности характеризует трение в счетчике, зависящее от его конструкции, качества изготовления и сборки его механизма, а также от физико-химических свойств измеряемого вещества;

емкость счетного механизма — наибольшее количество вещества, которое может быть отсчитано счетным механизмом прибора.

## 9.2. Скоростные счетчики

Принцип действия скоростных счетчиков аналогичен принципу действия турбинных расходомеров с той лишь разницей, что в расходомерах измеряется число оборотов турбинного датчика в единицу времени, а в счетчиках число оборотов суммируется за любой отсчетный промежуток времени. При этом суммарное число оборотов датчика  $N$  за отсчетный промежуток времени будет пропорционально объемному количеству жидкости  $V$ , протекающему по трубопроводу за тот же промежуток времени. Следовательно, уравнение измерений скоростных счетчиков имеет вид

$$V = cN, \quad (9.1)$$

где  $c$  — коэффициент, в общем случае зависящий от конструктивных особенностей счетчика, расхода и физико-химических свойств измеряемой жидкости.

Скоростные счетчики выпускают двух основных конструктивных модификаций: счетчики с аксиальным и тангенциальным подводом жидкости к турбинному датчику прибора. Устройство счетчика с аксиальным подводом жидкости показано на рис. 96. Поток жидкости, поступая в прибор, выравнивается струевыпрямителем 5 и направляется на лопасти аксиальной турбинки 3, выполненной в виде многозаходного винта. Вращение турбинки через червячную пару 1 и передаточный механизм 6, помещенный в корпус 2, передается счетному устройству 7, которое имеет стрелочные указатели с делениями, оцифрованными в литрах или кубических метрах. Возможность отсчета показаний непосредственно в единицах объемного количества (а не в числах оборотов турбинки) обеспечивается регулировкой передаточного числа механизма 6, соответствующим подбором сменных шестерен и регулировкой скорости вращения турбинки специальным регулировочным устройством 4. Устройство позволяет поворачивать одну из радиальных перегородок струевыпрямителя относительно направления потока. Вследствие этого часть потока, заключенная между поворотной регулировочной пластиной и соседними перегородками струевыпрямителя, в зависимости от угла поворота пласт-



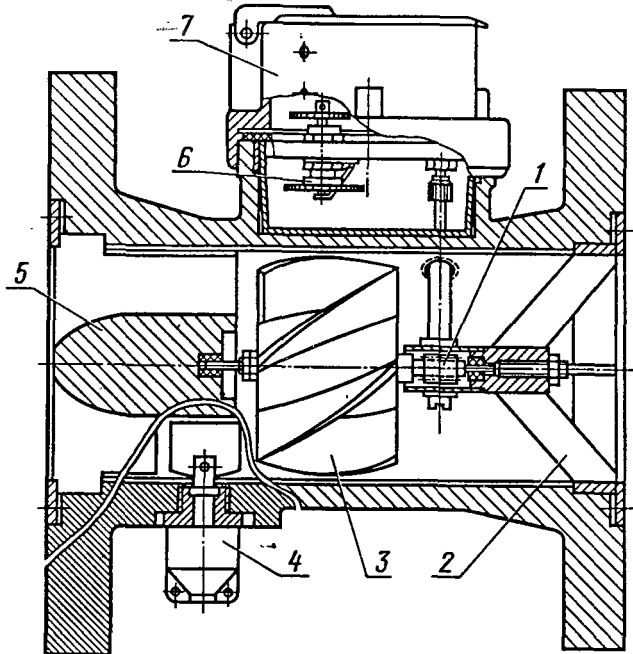


Рис. 96. Скоростной счетчик с аксиальной турбиной

тины будет подталкивать или тормозить вращающуюся турбинку. Регулируя таким образом скорость вращения турбинки в процессе тарировки счетчика, добиваются соответствия (в пределах погрешности тарировки) между его показаниями и действительным количеством протекшей жидкости.

Устройство счетчика с тангенциальным подводом жидкости показано на рис. 97. В этих счетчиках турбинку выполняют вертикальной прямолопастной. Поток жидкости подается по касательной к окружности, описываемой средним радиусом лопастей. Жидкость может подводиться на лопасти одной (одноструйные счетчики) или несколькими (многоструйные счетчики) струями. Конструктивное отличие многоструйного счетчика от одноструйного (см. рис. 97) состоит в том, что турбинку помещают в цилиндрическую камеру (рис. 98). Камера имеет два ряда равномерно распределенных по окружности сопел. Через нижний ряд сопел жидкость подается на лопасти турбинки, через верхние (обратные по направлению) отводится из камеры. В многоструйных счетчиках с прямым и обратным течением жидкости в зависимости от направления потока назначение сопел может меняться.

Одноструйные и многоструйные счетчики обладают рядом сравнительных достоинств и недостатков. Так, одноструйные счетчики более

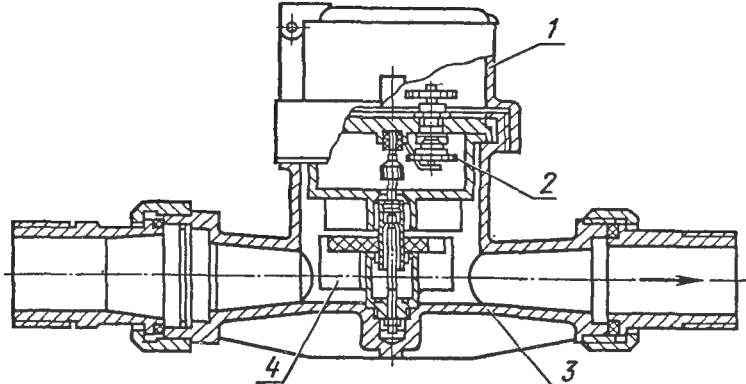


Рис. 97. Скоростной счетчик с тангенциальной турбиной:  
 1 — счетный механизм; 2 — передаточный механизм; 3 — корпус прибора; 4 — турбинка

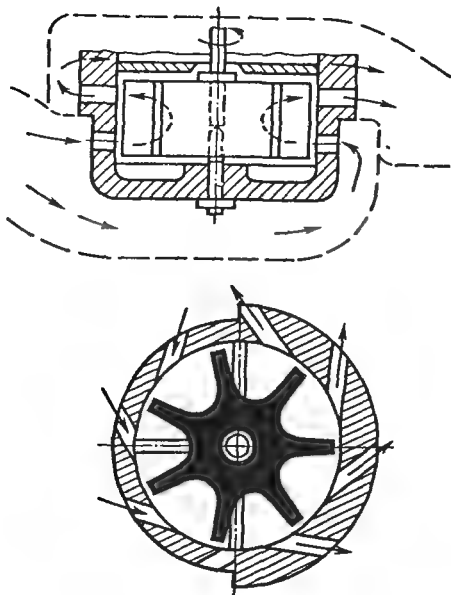


Рис. 98. Камера многоструйного скоростного счетчика с тангенциальной турбиной

просты по конструкции и обладают меньшей потерей давления. Однако они менее надежны в эксплуатации вследствие одностороннего износа опоры и значительного изменения показаний при засорении сетки фильтра. В многоструйных счетчиках опора изнашивается равномерно. Однако при том же калибре они имеют несколько меньшую по диаметру турбинку, которая быстрее вращается и скорее изнашивается.

В зависимости от того, отделен ли счетный механизм прибора от измеряемой среды перегородкой и сальниковыми уплотнениями или измеряемая среда заполняет весь механизм счетчика вплоть до стекла над счетным указателем счетчики подразделяют соответственно на „сухоходы” и „мокроходы”. Счетчики „мокроходы” более просты по конструкции, обладают большей чувствительностью и точностью, так как в них существенно меньше потери на трение (отсутствуют сальниковые уплотнения), и более удобны в эксплуатации. Однако из-за грязи и абразивных включений в измеряемых жидкостях большее распространение получили счетчики „сухоходы”, счетный механизм которых защищен от воздействия вредных примесей.

Показания тангенциальных счетчиков регулируют или вертикальным перемещением турбинки, изменяя высоту опорного шипа, или перемещением специальной пластины, установленной у верхнего торца турбинки, или отводом части потока жидкости из измерительной камеры в обводной канал. Первые два способа регулирования основаны на изменении гидравлического сопротивления, оказываемого потоком жидкости вращению турбинки за счет изменения зазоров между ее торцами и неподвижными частями камеры (дном или регулировочной пластинкой).

Существенным недостатком скоростных аксиальных и тангенциальных счетчиков является зависимость их показаний от вязкости измеряемой жидкости. При изменении вязкости изменяется коэффициент пропорциональности  $c$  в уравнении (9.1), поэтому скоростные счетчики применяются исключительно для измерения количества воды.

Погрешность показаний скоростных счетчиков при их правильной регулировке и нормальной эксплуатации находится в пределах  $\pm (2-3) \%$  и в зависимости от расхода имеет вид, изображенный на рис. 99.

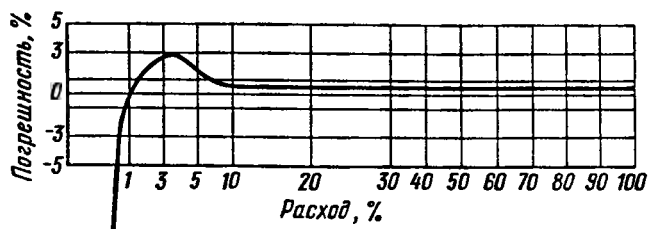


Рис. 99. График погрешности показаний скоростных счетчиков

Счетчики с аксиальными турбинками применяют для измерения количества воды при больших расходах в промышленных системах водоснабжения; счетчики с тангенциальными турбинками — для измерения количества воды при малых расходах (например, в бытовых водопроводах и малых отопительных системах). Возможность применения аксиальных водосчетчиков для измерений при больших расходах обуславливается тем, что вся лобовая поверхность аксиальной турбинки защищена

от осевого действия потока неподвижным объектом, на котором крепятся струевыпрямительные перегородки (см. рис. 96).

Счетчики с аксиальной турбинкой с обозначением ВВ изготавливают калибрами от 50 до 300 мм и применяют для измерений количества воды при расходах от 3 до 1300 м<sup>3</sup>/ч. Эти счетчики можно устанавливать как на горизонтальных, так и на наклонных участках трубопровода. Необходимая для их нормальной эксплуатации длина прямого участка составляет 8—10 диаметров трубопроводов перед счетчиком и 2—3 диаметра за ним.

Тангенциальные счетчики с обозначением СВК (одноструйные) или СВМ (многоструйные) изготавливают калибрами от 15 до 40 мм на характерные расходы от 3 до 20 м<sup>3</sup>/ч. Их можно устанавливать только на горизонтальных участках трубопровода, однако для нормальной работы не требуются прямые участки большой длины.

При выборе скоростных счетчиков ориентируются не на их характерный расход, а на допустимую потерю напора, которая при длительной работе счетчика на наибольшем расходе не должна превышать 0,02—0,03 кгс/см<sup>2</sup>. Это существенно снижает предел измерения (по расходу) скоростных счетчиков, составляющий в лучшем случае 6:1.

Когда по условиям измерений необходимы более широкие диапазоны изменения расходов, используют комбинированные водосчетчики, состоящие из двух счетчиков — основного аксиального и вспомогательного тангенциального, работающих от одной магистрали, и переключающего клапана. Счетчики подбирают таким образом, чтобы верхний предел измерения вспомогательного совпадал с нижним пределом основного счетчика.

На рис. 100, а показана схема комбинированного водосчетчика с параллельным включением. При малых расходах количество протекающей воды измеряется только вспомогательным счетчиком 2, так как подводящий трубопровод основного счетчика 1 перекрыт клапаном 3. При увеличении расхода увеличивается перепад давлений на вспомогательном счетчике.

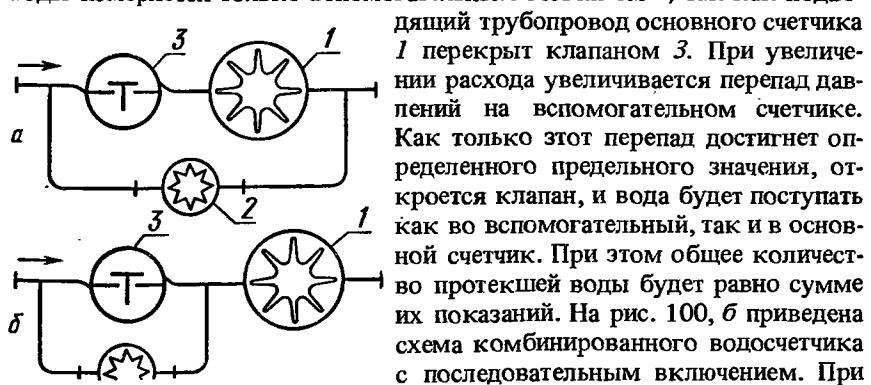


Рис. 100. Схема комбинированного водосчетчика

Как только этот перепад достигнет определенного предельного значения, откроется клапан, и вода будет поступать как во вспомогательный, так и в основной счетчик. При этом общее количество протекшей воды будет равно сумме их показаний. На рис. 100, б приведена схема комбинированного водосчетчика с последовательным включением. При малых расходах, меньших порога чувствительности основного счетчика, количество протекающей воды измеряется вспомогательным счетчиком 2. При увеличении расхода под действием разности давлений откроется кла-

пан 3 и „включится в работу” основной счетчик 1. При этом, вследствие меньшего гидравлического сопротивления подводящего трубопровода основного счетчика поток воды через вспомогательный будет настолько мал, что прибор не будет работать.

В качестве переключающего устройства в комбинированных водосчетчиках используют грузовые клапаны, в которых действие разности давлений уравнивается весом соответствующего груза.

Для уменьшения габаритных размеров, а также удобства монтажа и обслуживания комбинированные водосчетчики изготавливают в одном общем корпусе.

### 9.3. Объемные счетчики

Недостатком скоростных счетчиков, как уже указывалось выше, является существенная зависимость их показаний от вязкости жидкости протекающей через счетчик. Этот недостаток в значительной мере отсутствует у объемных счетчиков, поэтому ими измеряют количество чистых промышленных жидкостей, нефтепродуктов и сжиженных газов, т. е. жидкостей с широким диапазоном изменения вязкости. Кроме того, объемные счетчики обеспечивают высокую точность измерений (относительная погрешность их обычно не превышает 0,5 %) и достаточный для условий применения диапазон измерений.

Принцип действия объемных счетчиков основан на суммировании объемов жидкости, вытесненных из измерительной камеры прибора за любой отсчетный промежуток времени.

Основными элементами объемных счетчиков жидкостей являются измерительная камера определенного объема и конфигурации и перемещающийся в ней рабочий орган (поршень, диск, шестерни и т. д.). Рабочий орган счетчика перемещается под действием разности давлений на входе и выходе измерительной камеры при протекании через нее измеряемой жидкости. За каждый цикл своего перемещения рабочий орган вытесняет определенный объем жидкости, равный  $V$ . Суммарное число перемещений  $N_c$  рабочего органа фиксируется счетным механизмом. По разности показаний счетного механизма в конце и в начале какого-либо промежутка времени определяется объемное количество жидкости  $V_T$ , протекавшей через прибор за этот промежуток времени.

Таким образом, общее для всех объемных счетчиков уравнение измерений имеет вид

$$V_T = VN_c. \quad (9.2)$$

В зависимости от конструктивных особенностей рабочего органа (поршень, шестерни и т. п.), а также от вида движения, совершаемого рабочим органом при работе счетчика (поступательное, вращательное — ротационное, сложное колебательное — прецессионное, сложное вращательное — планетарное), объемные счетчики классифицируют на:

поршневые (цилиндрические) с поступательным движением цилиндрического поршня;

поршневые (дисковые) с прецессионным движением дискового поршня;  
 поршневые (кольцевые) с планетарным движением кольцевого поршня;  
 шестеренные (круглые) с ротационным вращением круглых шестерен;  
 шестеренные (овальные) с ротационным вращением овальных шестерен;  
 лопастные (камерные) с ротационным вращением лопастей, выполненных в виде камер;  
 лопастные (пластинчатые) с ротационным вращением пластинчатых лопастей.

Счетчики поршневые (цилиндрические) поступательные применяются для измерения количества жидкостей большой вязкости (мазута, смолы и др.).

По конструкции счетчики с цилиндрическими поршнями отличаются друг от друга количеством поршней, их расположением (горизонтальным или вертикальным), направлением действия потока жидкости на поршень, и, наконец, видом распределительного устройства.

Рассмотрим работу поршневого мазутомера (рис. 101) — это четырехпоршневой счетчик с вертикальными поршнями, золотниковым распределительным устройством и односторонним действием жидкости на поршни.

В корпусе счетчика 5 на шаровой опоре установлен четырехпоршневой гидромотор. Штоки поршней 1 шаровыми шарнирами опираются на диск 2, который связывает их в единый механизм. Наклон диска ограничивается опорной тарелкой 3. Ход поршней и, в конечном счете, показания счетчика регулируют, изменяя высоту установки опорной тарелки. Поршневой механизм закрыт крышкой, в которой размещены золотниковое устройство и редуктор счетного механизма. Крышка имеет полости А и Б для подвода и отвода жидкости из золотникового устройства.

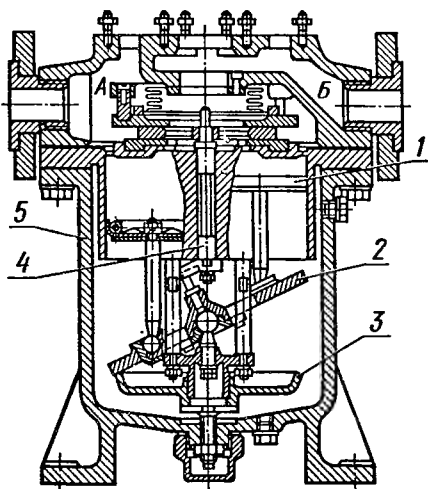


Рис. 101. Поршневой мазутомер

При работе счетчика золотниковое распределительное устройство поочередно сообщает полости цилиндров над поршнями с полостями в крышке, через которые подводится и отводится измеряемая жидкость. При перемещении поршней диск совершает колебательное движение, обкатываясь по опорной тарелке. При этом начинает вращаться коленчатый валик 4, число оборотов которого пропорционально суммарному количеству жидкости, протекшей через счетчик.

Счетчики с цилиндрическими поршнями обладают высокой точностью (известны счетчики с уплотненными цилиндрическими поршнями, погрешность показаний которых не превышает 0,7%) и чувствительностью. Однако они громоздки, сложны в эксплуатации и вызывают большие потери давления.

Счетчики поршневые (дисковые) прецессионные (рис. 102) получили преимущественное распространение в практике измерения количества

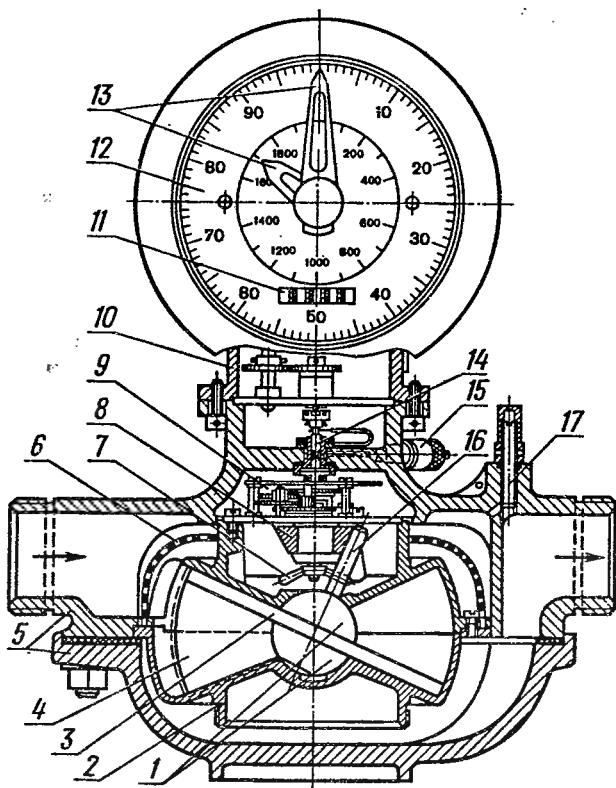


Рис. 102. Дисковый счетчик

промышленных жидкостей. При протекании через счетчик измеряемой жидкости под действием разности давлений колеблется дисковый поршень 3. Число колебаний поршня, пропорциональное количеству протекающей жидкости, фиксируется счетным механизмом 11, 12, 13, размещенным в головке 10. Измеряемая жидкость поступает через входной патрубок и предохранительную сетку 6 в измерительную камеру 2. Внутренняя часть боковой поверхности камеры выполняется в виде шарового пояса, а внутренняя часть верхней и нижней поверхностей камеры — в виде усеченных конусов и шаровых сегментов, служащих подпятниками для дискового поршня, расположенного внутри камеры. Через отверстие верхнего подпятника проходит ось поршня 16, которая стягивает две по-

лусферы 7, являющиеся подшипниками диска. Дискový поршень имеет прорезь, через которую проходит радиальная перегородка 4, служащая одновременно и направляющей, препятствующей повороту диска, и устройством, исключаящим возможность непосредственного перетекания жидкости из входного патрубка в выходной. Ось поршня 16 опирается на направляющий конус 8 так, что диск все время остается в наклонном положении, соприкасаясь с боковой (шаровой), верхней и нижней торцовыми (конусными) поверхностями.

Поступающая в измерительную камеру жидкость может попасть в выходной патрубок, только обтекая опорную полусферу, приводя тем самым диск в сложное колебательное — прецессионное движение. При этом ось диска обкатывается вокруг направляющего конуса, приводя во вращение поводок 7. Число оборотов поводка через передаточный механизм 9 и приводной валик 14 передается на стрелочный указатель 13 и роликовый счетный указатель 11.

Показания прибора регулируют перепуском части жидкости непосредственно из входного патрубка в выходной регулировочным винтом 17. Весь механизм счетчика размещается в корпусе 5. Смазка трущихся деталей механизма осуществляется с помощью масленки 15. Вследствие неразрывности потока измеряемой жидкости дисковый поршень непрерывно колеблется. При каждом полном колебании диска через измерительную камеру прибора протекает определенная порция жидкости, теоретически равная объему камеры за вычетом объема диска с шаровой опорой и объема радиальной перегородки.

Дисковые (прецессионные) счетчики при правильном изготовлении и регулировке обладают большой чувствительностью и могут применяться для измерения количества жидкостей при весьма малых расходах. Чувствительность прибора тем выше, чем меньше вес диска и диаметр опорного шара и чем больше диаметр диска.

Ввиду того, что часть жидкости, протекающая через зазор между диском и шаровой поверхностью измерительной камеры, не учитывается, этот зазор должен быть минимальным (в зависимости от вязкости жидкости) и одинаковым при всех положениях диска.

Для обеспечения надежности счетчиков материалы, из которых изготовляют их детали, подвергающиеся износу при работе счетчика, должны быть стойкими к истиранию. Диски изготовляют обычно из легких пластмасс или эбонита, а опорные поверхности — из твердого графита или специальных металлических сплавов.

Чтобы в счетчик не попал воздух, механические примеси и грязь, которые могут привести к интенсивному износу, понижению точности измерений или даже к заклиниванию диска, в сети подводящего трубопровода перед счетчиком необходимо устанавливать фильтр-газоотделитель с аварийным воздухоотборником.

Недостатком данных счетчиков является сложность их изготовления и ремонта.

**Счетчики поршневые (кольцевые) планетарные (рис. 103).** Счетчик состоит из корпуса 10, крышки 16, измерительной камеры, кольцевого



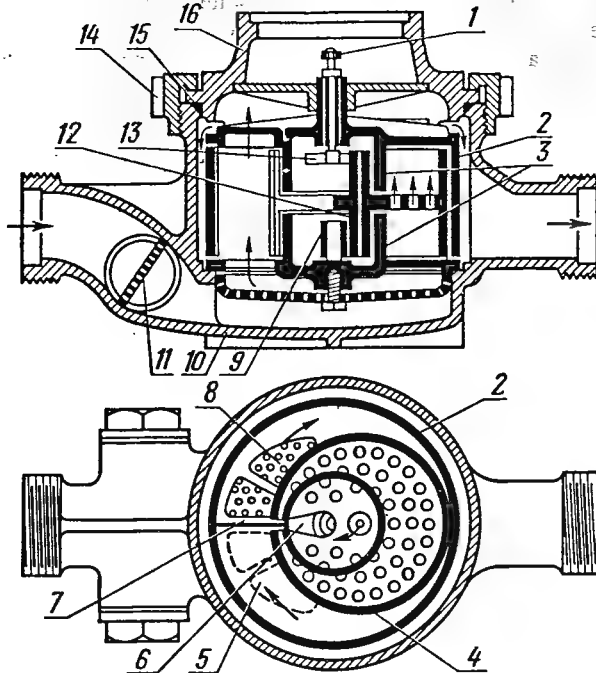


Рис. 103. Кольцевой счетчик

поршня 4, передаточного и счетного механизмов. Крышка соединяется с корпусом при помощи нажимного кольца 14 и уплотнения 15. Измерительная камера образуется внешним цилиндром 2 и двумя внутренними цилиндрическими выступами 3, соосными внешнему цилиндру. Один выступ составляет одно целое с нижним основанием цилиндра, другой — с верхним.

Жидкость поступает в измерительную камеру через предохранительную сетку 11 и отверстие 8 в нижнем основании внешнего цилиндра и вытекает через отверстие 5 в верхнем основании. Внутри измерительной камеры установлена радиальная перегородка 7, предотвращающая непосредственное перетекание жидкости из отверстия 8 в отверстие 5. Перегородка врезана в стенки внутренних кольцевых выступов, в верхнее и нижнее основание камеры. В центре нижнего основания имеется направляющий ролик 9.

#### К контрольному вопросу № 16

Ваше решение ошибочно. Вы или не поняли сути поверки расходомеров на образцовых установках, или не разобрались в принципе действия установок.

Вам необходимо повторить и то, и другое.

Кольцевой поршень 4 представляет собой цилиндр с поперечным ребром посередине, с осью 12 в центре ребра и осевой прорезью 6, в которую входит перегородка 7. В ребре поршня имеются отверстия для перетекания жидкости из нижней полости поршня в верхнюю.

Во время работы счетчика под действием разности давлений во входящем и выходящем потоках жидкости кольцевой поршень совершает планетарное движение внутри камеры, обкатываясь своей внутренней поверхностью по цилиндрическим выступам. В то же время ось поршня обкатывается вокруг направляющего ролика, а края скользят по радиальной перегородке. Движение поршня через поводок 13 и трубку 1 преобразуется во вращательное движение последней и с помощью передаточного механизма передается на стрелки и счетный указатель.

Принцип действия прибора иллюстрирует рис. 104, на котором изображены четыре положения кольцевого поршня. Жидкость поступает то во внешнее пространство между поршнем и стенкой измерительной камеры, то во внутреннее пространство между поршнем и внутренними цилиндрическими выступами. Из-за этого то на внешней, то на внутренней поверхностях поршня появляется избыточное давление, под действием которого поршень совершает сложное планетарное движение. За пол-

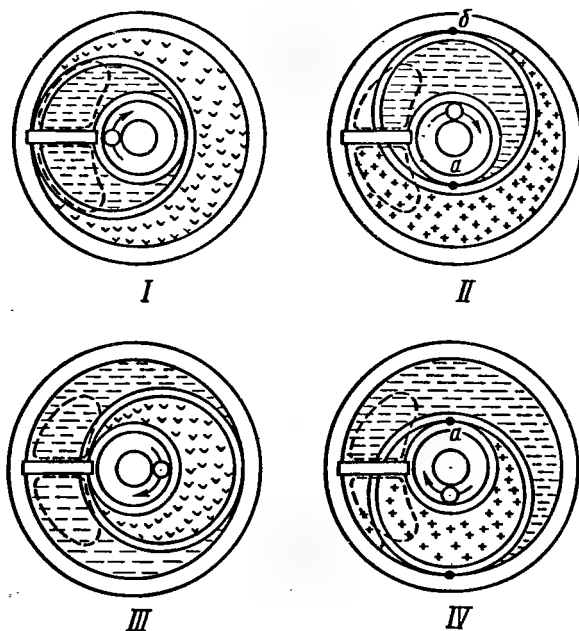


Рис. 104. Схема действия кольцевого счетчика

ный цикл движения поршня через счетчик протекает количество жидкости, теоретически равное объему измерительной камеры.

Счетчики с кольцевым поршнем несколько более надежны в эксплуатации по сравнению с рассмотренными выше объемными счетчиками других типов, так как при подаче жидкости снизу вверх через отверстия в ребре поршня уменьшается его трение о нижнее основание камеры. Для нормальной работы счетчики следует устанавливать на строго горизонтальных участках трубопровода.

**Счетчики ротационные с овальными шестернями** (рис. 105). Жидкость поступает во входной патрубок счетчика, протекает через сетку фильтра в измерительную камеру, и, приводя во вращение две овальные шестерни, выходит через выходной патрубок. Одна из шестерней имеет трибку, посредством которой вращение передается на передаточный и счетный механизмы.

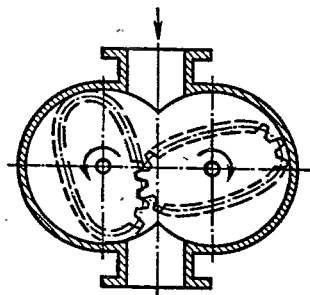


Рис. 105. Счетчик с овальными шестернями

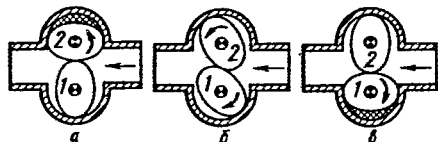


Рис. 106. Схема действия счетчика с овальными шестернями

Принцип действия счетчиков данного типа показан на рис. 106. В первом положении (рис. 106, а) разность давлений во входной и выходной частях камеры, действуя на обе шестерни, создает момент лишь на шестерне 2, поворачивающий ее против часовой стрелки. На плечи же (относительно оси ее вращения) шестерни 1 действуют одинаковые усилия от разности давлений. Таким образом, в этом положении шестерня 2, вращаясь под действием момента, приводит во вращение и шестерню 1. Во втором положении (рис. 106, б) на обе шестерни действуют вращающие моменты, однако абсолютное значение каждого из них меньше, чем момент, действующий на шестерню 2 в первом положении. Это объясняется тем, что из-за частичного перекрытия шестерен появляется обратный момент со стороны давления в выходном патрубке. И, наконец, в третьем положении (рис. 106, в) вращающий момент действует лишь на шестерню 1. По абсолютному значению этот момент равен моменту, действующему на шестерню 2 в первом положении, но направлен по часовой стрелке. В данном случае шестерня 1 ведет шестерню 2.

Нетрудно показать, что суммарный момент, приводящий шестерни во вращение, в любом их положении остается постоянным и равным  $\Delta p l^3 / 8$ , где  $\Delta p$  — разность давлений во входном и выходном патрубках счетчика,  $l$  — длина большой оси овальной шестерни. Следовательно, при

установившемся потоке жидкости (при установившемся и постоянном  $Dp$ ) шестерни приобретают установившееся вращение с постоянной угловой скоростью; вытесняя за каждый оборот измерительный объем, ограниченный стенками и образующими камеры и шестерни.

Для уменьшения неконтролируемых утечек измеряемой жидкости зазоры между вершинами зубьев и образующей измерительной камеры, а также между стенками камеры и торцами шестерен должны быть минимальными.

Малый вес шестерен, хорошее качество изготовления и сборки (с оптимальным размером зазоров) обеспечивает высокую чувствительность счетчиков с овальными шестернями и незначительное влияние изменений вязкости жидкостей на их показания. Поэтому эти счетчики довольно широко применяют при измерении количества самых разнообразных жидкостей и в первую очередь бензина, спирта и других маловязких жидкостей, для измерения количества которых в связи с вредным влиянием сухого трения (обусловленного малой вязкостью жидкости) счетчики других типов применять нежелательно.

Счетчики с овальными шестернями выпускают двух модификаций: СВШ — без обогрева на калибры от 12 до 250 мм и СШМ — с паровой обогревной рубашкой (для сильно вязких жидкостей) на калибры 12 и 40 мм. Счетчики можно устанавливать как на горизонтальных, так и на вертикальных участках трубопровода, однако, с обязательным условием, чтобы оси овальных шестерен были ориентированы строго горизонтально.

Счетчики лопастные (камерные) ротационные (рис. 107). Корпус 5

соединен с двумя патрубками для подвода и отвода измеряемой жидкости, расположенными под углом  $90^\circ$ . Внутри цилиндрической полости корпуса помещен ротор 6 с четырьмя полукруглыми пазми, в которых расположены четыре лопатки 1-4, выполненные в форме корытца. К торцам ротора крепятся две дисковые пластины с подшипниками для осей лопаток. Специальная система шестеренок, установленных между одной из торцовых пластин и задней крышкой камеры, обеспечивает неизменный наклон лопаток относительно горизонтальной оси счетчика.

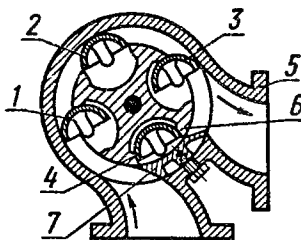


Рис. 107. Счетчик с камерными лопастями

Непосредственному перетеканию жидкости из входного отверстия в выходное препятствует вставка 7.

Под действием разности давлений во входном и выходном патрубках счетчика его ротор вращается, выбрасывая за каждый оборот в выходной патрубок количество жидкости, равное объему кольцевой камеры, ограниченной внутренней поверхностью корпуса, поверхностью ротора и поверхностями торцовых крышек.

Вращение ротора через передаточный механизм передается на счетный указатель.

Хорошее качество изготовления цилиндрической поверхности корпуса и прилегающих торцовых поверхностей ротора и крышек, а также некоторая эластичность тонких полусферических лопаток обеспечивают минимальные неконтролируемые утечки жидкости в счетчике, поэтому ими преимущественно измеряют количество маловязких жидкостей (легких нефтепродуктов, спирта и т. п.).

Эти счетчики легко ремонтировать. При необходимости замены комплекта ротора снимают заднюю крышку, вынимают его из корпуса и заменяют новым, не разбирая весь прибор.

Счетчики ротационные с круглыми шестернями отличаются от счетчиков с овальными шестернями лишь видом шестерен. Принцип же их работы одинаков.

На рис. 108 схематически показана камера счетчика с круглыми шестернями. Измеряемая жидкость поступает во входной патрубке, вращает две зубчатые шестерни и, протекая в пространстве, ограниченном зубьями

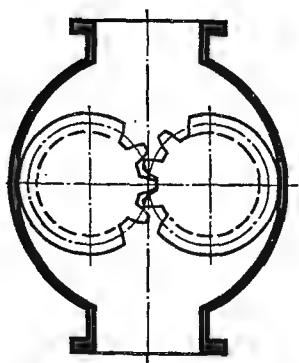


Рис. 108. Счетчик с круглыми шестернями

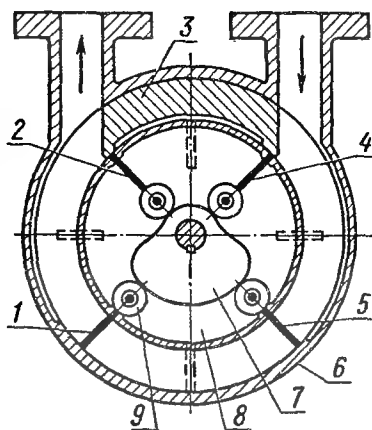


Рис. 109. Счетчик с пластинчатыми лопастями

шестерен и цилиндрическими поверхностями камеры, проходит в выходной патрубок. Вращение шестерен посредством передаточного механизма передается на счетный указатель. Измерительный объем этого счетчика (объем, вытесненный за полный оборот шестерен) ограничивается стенками камеры, ее образующей и поверхностью впадин между зубьями шестерен.

Счетчики лопастные (пластинчатые) ротационные (рис. 109). Измеряемая жидкость движется в пространстве, ограниченном цилиндрическими поверхностями корпуса 6 и ротора 8. Внутри ротора расположен неподвижный кулачок 7, на который опираются четыре ролика 9 с закрепленными на них лопастями 1, 2, 4 и 5. Давление жидкости, поступающей через входной патрубок на лопасть 5, приводит ротор во вращение, которое передается на счетный указатель. Ролики катятся по кулачку,

лопасти при этом поочередно занимают место снаружи и внутри ротора. Таким образом, за полный оборот ротора через счетчик проходит количество жидкости, равное разности объемов цилиндра и ротора. Перетеканию жидкости из входного отверстия в выходное препятствует вставка 3.

Элементы теории объемных счетчиков количества жидкостей. Различные типы объемных счетчиков количества жидкостей отличаются друг от друга кинематикой отдельных звеньев механизма, формой измерительной камеры и рабочего органа. Однако им присущи и общие характерные признаки, объединяющие все эти приборы в одну группу — группу счетчиков объемного типа.

Все счетчики объемного типа имеют рабочий орган, который, совершая под действием разности давлений то или иное движение внутри пространства камеры прибора, вытесняет объем жидкости (за один цикл своего движения), обычно принимаемый равным измерительному объему камеры.

В действительности же, из-за того, что у всех объемных счетчиков между рабочим органом и камерой имеются неплотности — зазоры, часть жидкости во время работы счетчика протекает через эти зазоры и не учитывается счетным механизмом.

Таким образом, движение рабочего органа под действием разности давлений и частичное протекание измеряемой жидкости через зазоры между рабочим органом и камерой и являются характерными признаками, объединяющими данные приборы в одну группу и позволяющими вывести общие зависимости между измеряемым количеством жидкости, погрешностью показаний счетчика, числом оборотов или колебаний рабочего органа и другими параметрами, определяющими конструкцию прибора (например, размером зазора, объемом камеры) и условия измерений (например, температурой окружающей среды, вязкостью протекающей жидкости).

Общая теория объемных счетчиков жидкостей была разработана во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологической службы (ВНИИМС) под руководством А.И. Петрова.

Изложим основные элементы этой теории, знание которых необходимо для правильного конструирования, правильной эксплуатации и грамотного метрологического обслуживания данного типа приборов. Пусть  $Q$  — объем жидкости, протекающей через счетчик в единицу времени (действительный расход);  $N$  — число оборотов или колебаний рабочего органа счетчика за ту же единицу времени;  $V$  — полезный (измерительный) объем камеры счетчика, вытесняемый рабочим органом за один оборот или колебание;  $q$  — объем жидкости, протекающий в единицу времени через зазоры между рабочим органом и камерой.

Тогда на основании вышеизложенного

$$Q = NV + q. \quad (9.3)$$

Обозначив  $Q_c$  — объем жидкости, учитываемый счетчиком в единицу времени (показания счетчика за единицу времени);  $A$  — объем жидкости, отсчитанный счетчиком за один оборот стрелки счетного указателя;  $n$  — передаточное число (число оборотов или колебаний рабочего органа), при котором счетчик отсчитывает объем, равный  $A$ , и приняв во внимание, что в единицу времени стрелка указателя счетчика сделает  $Q_c/A$  оборотов, а рабочий орган  $Q_c n/A$  оборотов или колебаний, формулу (9.3) можно представить в виде

$$Q = \frac{Q_c n V}{Q} + q. \quad (9.4)$$

Вспомним, что погрешность показаний счетчика

$$\delta_c = \frac{Q_c - Q}{Q} \cdot 100\%. \quad (9.5)$$

Исключая из уравнений (9.4) и (9.5) величину  $Q_c$ , получим

$$\frac{\delta}{100} = \left( \frac{A}{nV} - 1 \right) - \frac{A}{QnV} Q. \quad (9.6)$$

Расход жидкости  $q$  через зазоры зависит от площади сечения  $S$  щели между рабочим органом и камерой, протяженности этой щели  $l$  по высоте камеры (фактически  $l$  — это толщина рабочего органа), абсолютного размера этой щели  $h$ , скорости перемещения рабочего органа  $v_p$ , динамического коэффициента вязкости  $\mu$  измеряемой жидкости и перепада давлений  $\Delta p$  на счетчике, т. е.

$$q = f(S, l, h, v_p, \mu, \Delta p), \quad (9.7)$$

где  $f$  — некоторая функция от параметров, стоящих в скобках.

Если раскрыть вид функции  $f$ , пользуясь фундаментальными уравнениями гидродинамики, получим следующие формулы, определяющие расход жидкости через зазоры:

для счетчиков с цилиндрическим поршнем

$$q_{ц} = \frac{\pi R h^3}{6\mu l} \Delta p + \frac{Qh}{R}; \quad (9.8)$$

для счетчиков с дисковым поршнем

$$q_{д} = \frac{\pi R h^3}{12\mu l} \Delta p + \frac{\pi R^2 \psi h Q}{V}; \quad (9.8)$$

для счетчиков с кольцевым поршнем

$$q_{к} = \frac{\pi R h^3}{12\mu l} \Delta p + \frac{2\pi r R h}{V} Q, \quad (9.8)$$

где  $R$  — радиус рабочего органа;  $\psi$  — угол при вершине конической поверхности дискового счетчика, описываемой осью диска при его движении;  $r$  — радиус направляющего ролика, вокруг которого обкатывается ось кольцевого поршня в кольцевых счетчиках.

Перепад давлений на счетчике, характеризующий потери кинетической энергии, затрачиваемой на преодоление сил гидравлического и механического трения в механизме счетчика

$$\Delta p = \rho \xi_c \frac{4Q^2}{\pi d_y^5}, \quad (9.9)$$

где  $\rho$  — плотность измеряемой жидкости;  $d_y$  — диаметр условного прохода (калнбр) счетчика;  $\xi_c$  — коэффициент сопротивления счетчика.

На основании результатов многочисленных экспериментов и обобщающих выводов теории подобия было установлено, что коэффициент  $\xi_c$  функционально зависит от числа Рейнольдса, определяющего потери напора потока на чисто жидкостное трение в механизме счетчика, и безразмерной величины  $d_y G / Q\mu$  (где  $G$  — вес рабочего органа), определяющей потери напора на преодоление сил полусухого трения в механизме счетчика, т. е.

$$\xi_c = \varphi \left( \text{Re}, \frac{d_y G}{Q\mu} \right). \quad (9.10)$$

Вид функции  $\varphi(\text{Re}, \frac{d_y G}{Q\mu})$  зависит от типа, конструкции, а также качества изготовления и сборки счетчика.

Обозначив величину  $\xi_c \frac{4\rho}{\pi^2 d_y^5}$  через  $r$  на основании формул (9.8, а, б, в) и

(9.9), получим следующие уравнения погрешностей счетчиков объемного типа:

для счетчиков с цилиндрическим поршнем

$$\delta_{ц} = 100 \left( \frac{A}{nV} - 1 \right) - \frac{50A\pi R h^3 k}{3Vn\mu l} Q - \frac{100Ah}{nVR}; \quad (9.11)$$

$$\delta_d = 100 \left( \frac{A}{nV} - 1 \right) - \frac{25A\pi R h^3 R}{3nV\mu l} Q - \frac{100A\pi R^2 \psi h}{nV^2}; \quad (9.11)$$

для счетчиков с кольцевым поршнем

$$\delta_k = 100 \left( \frac{A}{nV} - 1 \right) - \frac{25A\pi R h^3 k}{3nV\mu l} Q - \frac{200A\pi R h}{nV^2}. \quad (9.11, в)$$

Формулы (9.11, а-в), связывающие воедино метрологические и конструктивные параметры счетчиков с количеством и свойствами измеряемых жидкостей, условиями измерений, являются основными уравнениями общей теории счетчиков объемного типа. Они наглядно и количественно описывают те сложные физические процессы, которые происходят в работающем счетчике. Четкое понимание этих явлений, как уже отмечалось выше, необходимо для качественного изготовления и сборки, правильной эксплуатации и грамотной поверки объемных счетчиков.

Как следует из формул (9.11 а-в), погрешности показаний объемных счетчиков при одном и том же расходе для приборов, аналогичных по конструкции, зависят от:

- 1) размера зазора между рабочим органом и стенкой камеры счетчика;
- 2) вязкости измеряемой жидкости;
- 3) коэффициента  $R$ , характеризующего (кроме отмеченных факторов 1 и 2) качество изготовления и сборки счетчика;
- 4) температур окружающей среды и измеряемой жидкости.

Изменение указанных температур приводит к дополнительным погрешностям, связанным с термическим расширением материалов деталей счетчика, изменением объемов  $V$  измерительных камер, размеров зазоров  $h$ , а также с температурным изменением вязкости измеряемой жидкости и коэффициента  $R$ .

**Общие правила эксплуатации счетчиков объемного типа.** Обобщающие выводы предыдущего параграфа позволяют сформулировать основные требования к условиям нормальной эксплуатации счетчиков объемного типа. Эти условия должны быть такими, чтобы обеспечивалась их длительная и безотказная по точности работоспособность. На длительность работы счетчика сильно влияет износ трущихся деталей его механизма, в первую очередь рабочих органов и камер (что приводит к изменению зазора  $h$ ). Вследствие этого максимальную нагрузку на счетчик (максимальный рабочий расход) ограничивают предельно допустимым перепадом давлений, обычно принимаемым равным  $0,03-0,1$  кгс/см<sup>2</sup>. При больших перепадах давлений будут быстро изнашиваться детали счетчика, преждевременно увеличиваться зазоры между рабочим органом и камерой, а следовательно уменьшаться точность измерений.

В соответствии с указанными предельно допустимыми значениями перепадов давлений по известным значениям эксплуатационных расходов выбирают калибр счетчика. При этом необходимо также, чтобы в области эксплуатационных расходов погрешность счетчика по его номинальной характеристике не превышала допускаемую.

Интенсивность износа деталей счетчика в значительной мере зависит также от наличия механических абразивных примесей в измеряемой жидкости и ориентации счетчика. Поэтому для его нормальной эксплуатации необходимо очищать измеряемую жидкость специальными фильтрами, которые, как правило, поставляют вместе со счетчиками, и устанавливать счетчик на горизонтальных участках трубопровода.



Для предотвращения химической коррозии элементов счетчика необходимо, чтобы эксплуатируемый прибор всегда был заполнен измеряемой жидкостью.

Воздух в измеряемой жидкости сильно искажает показания объемных счетчиков. Как правило, при измерении количества маловязких жидкостей, которые насыщаются воздухом более интенсивнее, чем жидкости с большой вязкостью, непосредственно перед счетчиком устанавливают газоотделитель, выполненный в виде вертикального сосуда большого диаметра, сетчатый или центробежный фильтр.

Для нормальной работы счетчика необходимо соблюдать правильный температурный режим, обычно регламентируемый техническими условиями и соответствующими инструкциями.

Счетчик следует эксплуатировать на той жидкости, для измерения количества которой он предназначен (на которой он градуирован и поверен), так как его конструктивные и технологические параметры (зазоры, допуски и другие) рассчитывают, исходя из вязкости объекта измерений. В противном случае для нормальной (с гарантированной погрешностью) работы счетчика его показания необходимо корректировать соответствующими поправками.

При соблюдении всех правил нормальной эксплуатации погрешность показаний объемных счетчиков находится в пределах  $\pm (0,5-1,0) \%$  в зависимости от типа счетчика и измеряемой жидкости.

В качестве простого и наглядного примера рассмотрим установку и эксплуатацию объемного счетчика на бензораздаточной колонке (рис. 110). Бензин подается в прибор из подземного резервуара 12 насосом 9. Во всасывающей линии насоса установлены фильтр 10 и воздушный кран 11. Нагнетаемый насосом бензин протекает через газоотделитель 3, фильтр тонкой очистки 6, бензосчетчик 7, смотровой сосуд 5 с указателем уровня 4 и воздушным клапаном 2 и подается в раздаточный шланг 14 с краном 13. Для слива бензина служит кран 8. Пары бензина возвращаются в приемный резервуар по трубопроводу 1.

Бензосчетчик во избежание попаданий в него воздуха установлен ниже газоотделителя и находится всегда под заливом. Действие газоотделителя контролируют при помощи смотрового сосуда, в котором визуально наблюдается отсутствие или наличие в жидкости пузырьков газа. Работу газоотделителя проверяют краном 11, с помощью которого в нагнетаемый бензин искусственно добавляют воздух. Воздушный клапан 2 необходим для устранения гидравлических ударов при внезапном закрытии крана 13, а также для устранения влияний на показания счетчика засасывающего действия потока бензина при опорожнении шланга. С помощью указателя уровня 4 правильно устанавливают бензоколонку. При этом уровни, отмеченные на рис. 110 буквой *a*, должны находиться на одной горизонтальной плоскости.

Газоотделитель 3 представляет собой вертикальный сосуд большого диаметра, служащий для успокоения жидкости, изменения направления ее движения и вследствие этого естественного выделения пузырьков воздуха, которые собираются в обратном трубопроводе 1 и удаляются в ат-

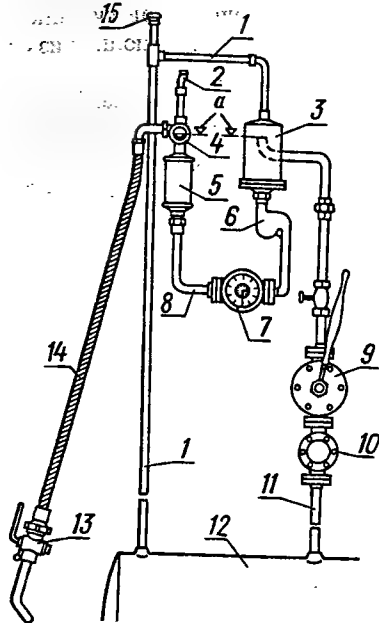


Рис. 110. Схема бензораздаточной колонки

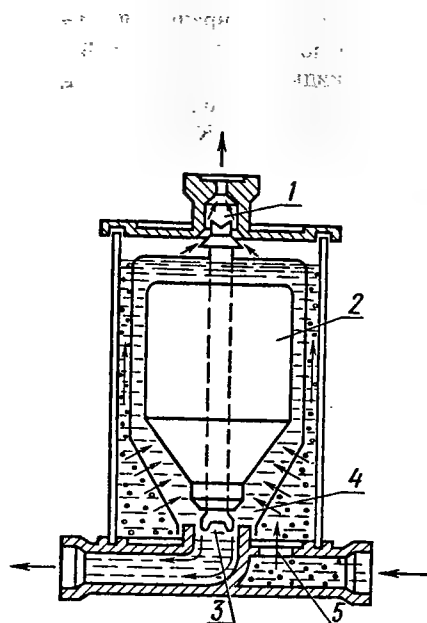


Рис. 111. Сетчатый фильтр-газоотделитель

мосферу при помощи воздушника 15. Кроме успокоительных сосудов в качестве газоотделителей применяют сетчатые или центробежные фильтры.

Схема сетчатого фильтра-газоотделителя показана на рис. 111. Бензин, содержащий пузырьки воздуха, подается через отверстие 5 к конусообразной сетке 4. Сетка имеет отверстия малого диаметра, через которые свободно проходит движущаяся сплошным потоком жидкость. Пузырьки же воздуха вследствие своего поверхностного натяжения задерживаются сеткой и поднимаются к выходному отверстию 1. Регулировочный поплавок 2, погруженный в жидкость, всплывая или опускаясь в зависимости от объемного веса жидкости (от остаточного содержания воздуха в бензине), изменяет в соответствии с этим проходное сечение отверстия 3 для выхода жидкости и отверстие 1 для выхода газа, регулируя таким образом необходимый для нормального газоотделения расход.

Схема центробежного фильтра-газоотделителя показана на рис. 112. Поток бензина подается в газоотделитель через радиальный трубопровод 2 по касательной к установленной в камере газотделителя конусной перегородке. Вследствие этого столб бензина в камере приобретает винтообразное движение. Под действием центробежной силы более тяжелые частицы жидкости как бы отбрасываются к стенкам камеры, а легкие

пузырьки воздуха группируются в центре и через отверстие в перегородке поступают к клапану 4. Этот клапан регулирует выходное отверстие для сброса воздуха в отводной трубопровод 1 в зависимости от давления

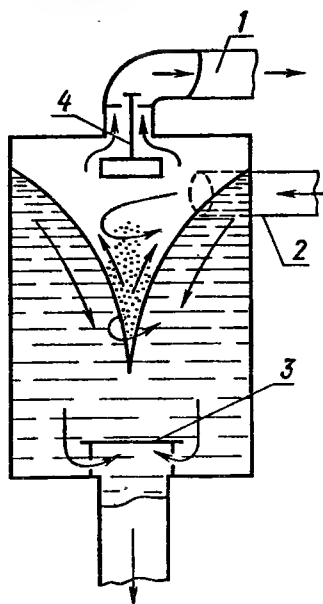


Рис. 112. Центробежный фильтр-газораспределитель

потока жидкости в камере. Над выпускным трубопроводом устанавливается подпорная пластина 3, препятствующая просасыванию газового столба. Чтобы избежать потерь бензина, увлекаемого выделяющимся воздухом, и для противопожарной безопасности отводные трубопроводы соединены с баком.

Рассмотренный пример показывает, сколь сложно и многообразно „аппаратурное оформление”, необходимое для нормальной работы счетчиков объемного типа.

### Контрольный вопрос № 17

Как Вы думаете, на показания каких счетчиков — скоростных или объемных в большей степени влияет неустановившийся характер потока измеряемой жидкости?

Если Вы решите, что на показания скоростных счетчиков — см. с. 246, если — объемных — см. с. 248.

### К контрольному вопросу № 16

Вы правы — повторять поверку не нужно.

Абсолютная ошибка показаний электромагнитного расходомера  $\Delta$ , поверенного на весовой расходомерной установке, определяется как

$$\Delta = Q_p = \frac{M_y}{\rho},$$

где  $Q_p$  — показание расходомера;  $M_y$  — массовый расход, измеренный установкой;  $\rho$  — плотность рабочей жидкости установки. Насыщение рабочей жидкости воздухом приводит к уменьшению плотности  $\rho$ , а следовательно, к еще большей абсолютной ошибке  $\Delta$ .

#### 9.4. Барабанные и весовые счетчики

Принципиальная схема барабанного счетчика показана на рис. 113. Вращающийся вокруг оси барабан состоит из внутреннего распределительного и наружного измерительного цилиндров. Измерительный цилиндр разделен перегородками на три камеры 4, 8, 1 равного объема. Жидкость поступает по трубопроводу 7 во внутренний распределительный цилиндр. Переливаясь через щель 2, жидкость заполняет камеру 4. Заполнив камеру 4 по переливное ребро, жидкость будет переливаться в камеру 5. При этом за счет смещения центра тяжести 3 барабан начнет вращаться против часовой стрелки, а жидкость из камеры 4 будет вытекать в нижнюю часть корпуса счетчика, а оттуда — в выходной трубопровод. Цикл заполнения камер повторяется, и барабан приходит в устойчивое вращение, которое передается счетному механизму.

Измеряемое количество жидкости пропорционально числу оборотов барабана и рабочему объему измерительных камер.

Показания счетчика регулируют, изменяя объем камеры. Для выпуска воздуха, выделяющегося из измеряемой жидкости при заполнении камер, в стенках камер имеются отверстия 6.

Значение момента, вращающего барабан, а следовательно, и предел измерения счетчика зависят от плотности измеряемой жидкости.

Барабанные счетчики применяют для измерения количества чистых, маловязких жидкостей в спиртовой и химической промышленности. При хорошей балансировке барабана и правильной регулировке погрешность барабанных счетчиков не превышает  $\pm 0,5\%$ .

Принципиальная схема весового счетчика с качающимися сосудами показана на рис. 114. Прибор состоит из двух трехгранных измерительных сосудов I и II с одним общим ребром 2. Сосуды опираются на ось I, относительно которой происходит их качание. Каждый измерительный сосуд снабжен воронкой 7 с расширяющейся горловиной, предохраняющей жидкость от разбрызгивания. Кроме того, измерительные сосуды имеют дополнительные желоба. При заполнении одного из сосудов по трубе 6 до перелива жидкости через порог 4 в желоб 3 центр тяжести системы смещается и измерительные сосуды опрокидываются. Жидкость из заполненного сосуда выливается.

Таким образом, при работе счетчика измерительные сосуды попеременно то наполняются, то опорожняются. При этом ось поворачивается и приводит в действие счетный механизм. Угол качания сосудов ограничен демпферными упорами 5.

Погрешность данных счетчиков зависит от расхода измеряемой жидкости вследствие дополнительного натекания жидкости во время опрокидывания сосудов и обычно не нормируется.

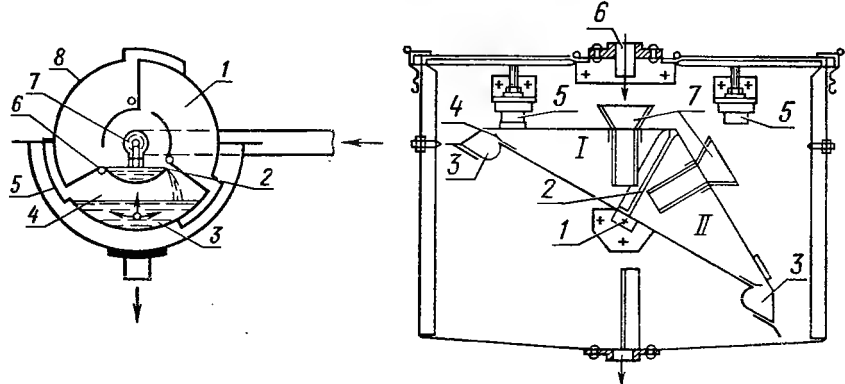


Рис. 113. Схема барабанного счетчика      Рис. 114. Схема весового счетчика с качающимися сосудами

Весовые счетчики применяют в строительной и горнообогатительной промышленности для измерения количества грязных жидкостей, имеющих значительные твердые взвеси и включения.

## Глава 10. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОВЕРКИ СЧЕТЧИКОВ КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТЕЙ

### 10.1. Испытательные установки для поверки счетчиков количества жидкостей

Для поверки счетчиков количества жидкостей применяют испытательные установки двух типов: объемные и весовые, отличающиеся принципом измерения количества протекшей через счетчик жидкости.

**Объемные испытательные установки (рис. 115).** Установка состоит из: мерного бака 28; устройства для измерения расхода, включающего сопловое приспособление 2 и указатель расхода 4; стола 15, снабженного устройством 9 для подсоединения счетчиков 10 к трубопроводам, и спускным краном 13; трубопровода 7, отводящего жидкость от счетчиков в мерный бак, снабженного регулировочной задвижкой 8, смотровым стеклом 6 и кранами 1 для соединения с атмосферой; трубопровода 16, подводящего жидкость от насоса 19 к поверяемым счетчикам, с установленным на нем фильтром-газоотделителем 14, манометром 12, пусковым краном или задвижкой 11 и термометром 5; трубопровода 22, отводящего воздух из мерного бака (а также и жидкость при случайном переполнении бака) в хранилище; трубопровода 18, отводящего газы и воздух из фильтра-газоотделителя 14 в хранилище 20;

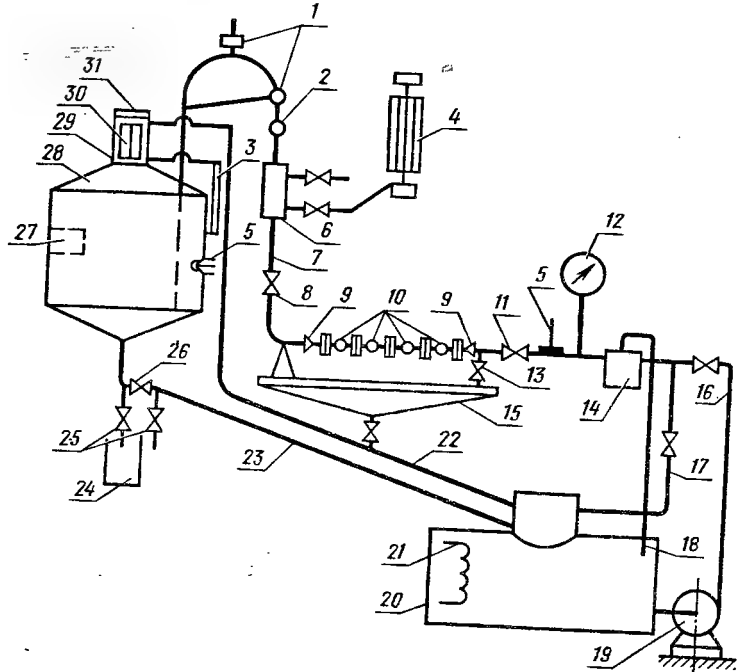


Рис. 115. Схема объемной испытательной установки для счетчиков количества жидкостей

разгрузочного трубопровода 17, отводящего часть жидкости из трубопровода 16 в хранилище; хранилища (сливного бака) 20, снабженного устройством 21 для нагрева или охлаждения рабочей жидкости; отстойника 24.

Мерные баки объемных испытательных установок для счетчиков количества нефтепродуктов и других промышленных жидкостей выполняются в виде образцовых мерников и имеют суженую горловину 29, необходимую для повышения точности отсчета налитой в бак жидкости, компенсатор объема 27, термометр 5 и уровнемерное стекло 3. Горловина 29 снабжена смотровым стеклом со шкальной пластиной 30 для визуального отсчета количества залитой в бак жидкости и крышкой 31, предохраняющей рабочую жидкость от испарения.

Компенсатор 27 служит для регулирования объема мерного бака в процессе его градуировки или поверки и представляет собой цилиндрическое тело, которое перемещается в сальниковых направляющих при помощи винтового механизма. Объем бака регулируют, изменяя длину части цилиндрического тела, находящуюся внутри бака.

Термометр 5 служит для измерения температуры рабочей жидкости в баке. По показаниям данного термометра и термометра, измеряющего температуру рабочей жидкости перед поверяемым счетчиком, определяют соответствующие поправки показаний счетчика.

Кроме формы, показанной на рис. 115, мерные баки объемных установок могут быть выполнены и в виде технических мерников с горизонтальной или наклонной осью. Мерные баки испытательных установок для водосчетчиков практически не отличаются от баков объемных расходомерных установок, описанных выше.

Рабочая жидкость из мерных баков сливается с помощью устройств 26, представляющих собой обычные задвижки или грузовые клапаны.

Для периодической проверки герметичности сливных устройств непосредственно за ними в сливном трубопроводе 23 устанавливают краны малого сечения 25.

Существенное влияние на точность поверки счетчиков оказывает объем и площадь сечения горловины мерного бака. Обычно рабочий объем мерных баков выбирают равным наибольшему из следующих двух объемов:

объема жидкости, измеряемого счетчиком за пять оборотов большой стрелки его счетного указателя (500 наименьших делений роликового счетного указателя для счетчиков, у которых стрелочный указатель отсутствует);

объема жидкости, протекающего через поверяемый счетчик наибольшего для данной установки калибра за 2 мин при максимальном поверочном расходе.

Размеры горловины бака определяют, исходя из нормированной погрешности отсчета  $\delta_0$  количества залитой в бак жидкости.

Если  $S$  — площадь сечения горловины,  $\Delta h$  — ошибка отсчета уровня жидкости по шкале смотрового стекла горловины, а  $V_p$  — рабочий объем мерного бака, то  $S = \delta_0 \cdot V_p / \Delta h$ .

Обычно для объемных испытательных установок счетчиков нефтепродуктов  $\delta_0$  принимают равной 0,05 %,  $\Delta h$  — 0,003 м.

Для более спокойного наполнения мерных баков, а следовательно, для уменьшения насыщения воздухом рабочую жидкость, как правило, подают в нижнюю часть мерных баков, а в случае необходимости (для пенообразующих жидкостей) баки дополнительно снабжают специальными пеногасительными устройствами в виде набора сеток.

Мерные баки устанавливают строго вертикально с помощью отвесов, монтируемых на баках. Это необходимо для обеспечения требуемой точности отсчета.

Каждая испытательная установка предназначена для поверки счетчиков нескольких калибров с различными максимальными поверочными расходами  $Q_{\max}$  (в пределах диапазона измерений установки). Кроме того, счетчики одного калибра поверяют обычно на трех определенных расходах, что позволяет судить о погрешности счетчика во всем диапазоне измерений. Вследствие этого установки снабжаются специальными регулировочными устройствами в виде сопловых приспособлений и

регулирующих задвижек. Сопловое приспособление состоит из набора (по числу калибров счетчиков, поверяемых на данной установке), сопел или насадок, каждое из которых обеспечивает максимальный поверочный расход счетчика определенного калибра при полностью открытой регулировочной задвижке. Любой поверочный расход в пределах  $Q_{\max}$  настраивается с помощью регулировочной задвижки.

Сопловое приспособление устанавливают на вертикальном участке трубопровода, отводящего рабочую жидкость от счетчика к мерному баку. В водомерных установках с открытым истечением (а не под уровень жидкости) сопловое приспособление устанавливается непосредственно на выходе потока в атмосферу.

Расход через установку при этом характеризуется напором жидкости перед насадкой, так как давление за насадкой в достаточной мере постоянно. Напор перед насадкой измеряют обычно чашечным манометром с ртутным или жидкостным заполнением. Шкалу манометра (указателя расхода) градуируют или в единицах расхода, или в миллиметрах. В последнем случае к указателю прикладывают таблицу расходов, соответствующих различным высотам ртутного или жидкостного столба в манометре.

Диаметр отверстия насадки или сопла  $d$  в метрах для каждого калибра поверяемого счетчика определяют по расчетной формуле сужающих устройств, приведенной к виду

$$d = 0,95 \sqrt{\frac{Q_{\max}}{\alpha \sqrt{\frac{p_{\max}}{\rho}}}}, \quad (10.1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент расхода, принимаемый равным 0,98—1,18 для сопел и 0,8—0,97 для насадок;  $p_{\max}$  — максимальный напор, на который рассчитан указатель расхода установки, Па;  $\rho$  — плотность рабочей жидкости установки, кг/м<sup>3</sup>. Формулу (10.1) применяют и для расчета шкал указателя расхода. Как следует из этой формулы, при постоянных  $d$  и  $\alpha$  значения шкалы указателя расхода (высота уровня манометрической жидкости над нулевой отметкой шкалы  $h$  при любом расходе через установку  $Q$ ) определяется зависимостью

$$h = h_{\max} \frac{Q^2}{Q_{\max}^2},$$

где  $h_{\max}$  — высота уровня манометрической жидкости, соответствующая максимальному расходу  $Q_{\max}$ .

Чтобы надежно и качественно поверить счетчики, необходимо достаточно точно измерить расход на установке и обеспечить его стабильность в течение опыта. Так, погрешность показаний указателя расхода не должна превышать 2 % наибольшего значения его шкалы, а стабильность установленного поверочного расхода должна лежать в пределах  $\pm 2,5$  %.

Непостоянство (нестабильность) расхода в течение опыта вызывается изменением уровня жидкости в мерном баке при подводе потока в его нижнюю часть (под уровень), флуктуациями атмосферного давления, непостоянством подачи насоса и т. п.



Если требуемая стабильность расхода не может быть обеспечена при непосредственной подаче жидкости к счетчику от насоса, установку снабжают баком постоянного напора.

Для обеспечения нормальной работоспособности как поверяемых счетчиков, так и установки на трубопроводе, подводящем жидкость от насоса к счетчикам, монтируют фильтр-газоотделитель (для маловязких жидкостей) или грязевой фильтр (для вязких рабочих жидкостей).

Попадание воздуха в коммуникации установки существенно искажает показания счетчиков, указателей расхода и мерных баков. Снабжая сливные баки (хранилища) специальными устройствами, препятствующими попаданию пузырьков воздуха во всасывающую трубу насоса, располагая насос таким образом, чтобы жидкость из сливного бака поступала в него самотеком, сливая жидкость под уровень в сливном баке и другими мероприятиями, добиваются значительного уменьшения содержания воздуха в рабочих жидкостях испытательных установок. Кроме того, для визуального наблюдения за наличием пузырьков воздуха в потоке на подводящем трубопроводе 7 (см. рис. 115) монтируют смотровое устройство 6.

Кратковременно неустановившийся поток рабочей жидкости оказывает незначительное влияние на точность испытательных установок и погрешность показаний счетчиков. Вследствие этого для простоты и надежности окончание опыта на испытательной установке фиксируется обычно не „переброской” потока рабочей жидкости перекидным устройством, а остановкой (перекрытием) потока регулировочным краном или задвижкой. Причем, этот процесс должен быть достаточно быстрым, а для устранения явлений гидравлического удара, достаточно плавным. Оба эти требования обеспечиваются быстродействующими автоматическими приводными механизмами регулировочных кранов или задвижек.

При правильном проектировании, изготовлении, качественной проверке и нормальной эксплуатации предельная погрешность объемных испытательных установок, определяемая, по существу, лишь точностью измерения количества жидкости мерным баком, равна  $\pm 0,1\%$ .

Повышение точности данных установок лимитируют погрешности, связанные с налипанием рабочей жидкости на стенки мерного бака. Поэтому эти установки не рекомендуется применять для жидкостей, вязкость которых больше 0,15—0,20 П. Кроме того, после опорожнения мерного бака необходима определенная выдержка, чтобы с его стенок стекли остатки измеряемой жидкости. Длительность выдержки устанавливают при аттестации установок. Она обычно равна 1 мин при работе на бензине, керосине или воде и 3 мин при работе на более вязких жидкостях.

В последние годы в зарубежной и отечественной практике для проверки счетчиков промышленных жидкостей непосредственно на местах их эксплуатации применяют объемные трубопоршневые установки (ТПУ), принцип действия которых практически не отличается от принципа действия расходомерных трубопоршневых установок, рассмотренных в разд. 7.14.

Конструктивные особенности этих установок иллюстрируются на схеме, приведенной на рис. 116. Установка состоит из: „петли” 2, изго-

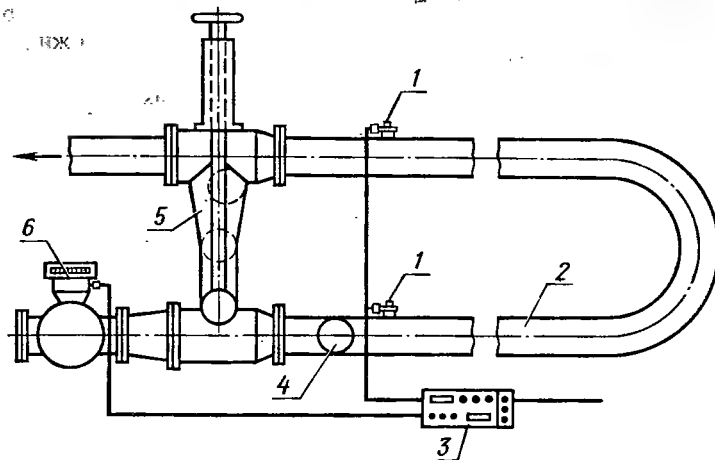


Рис. 116. Схема трубопоршневой испытательной установки

товленной из стальной бесшовной трубы, внутренняя поверхность которой покрыта специальным стойким покрытием; шарового поршня 4, выполняющего роль вытеснителя жидкости из „петли”; электронно-механических детекторов-переключателей 1, один из которых включает, а другой выключает электронное счетное устройство в моменты прохождения мимо них шарового поршня; клапана-манипулятора 5, при помощи которого шаровой поршень вводится в „петлю”. Запорное устройство клапана, представляющее собой второй шаровой поршень, препятствует перетoku жидкости из входного в выходной конец „петли”; фотоэлектрического датчика импульсов 6, преобразующего число оборотов вала поверяемого на ТПУ счетчика в пропорциональное число электрических импульсов; электронно-счетного устройства 3, регистрирующего суммарное число импульсов фотоэлектрического датчика за время прохождения шарового поршня от одного детектора-переключателя до другого.

ТПУ работает следующим образом. Через клапан-манипулятор 5 в „петлю” 2 вводится два шаровых разделителя 4. Один из них выполняет функции запорного устройства (шар-клапан), второй — шарового поршня, который под действием напора рабочей жидкости движется по „петле”. В момент прохождения шарового поршня мимо первого детектора 1 включается счетное устройство 3, измеряющее количество импульсов фотоэлектрического датчика, связанного с поверяемым счетчиком. В момент прохождения шарового поршня мимо второго детектора счетное устройство выключается. Пройдя калиброванный участок (участок „петли” между детекторами), шаровой поршень падает в клапан-манипулятор, выталкивает в поток шар-клапан и занимает его положение. Затем цикл повторяется.

Относительную погрешность поверяемого на ТПУ счетчика определяют по формуле

$$\delta = \left( \frac{N \cdot q - V}{V} \right) \cdot 100 \%, \quad (10.2)$$

где  $N$  — количество импульсов; измеренное счетным устройством за время прохождения шарового поршня от одного детектора-переключателя до другого;  $q$  — объем жидкости (показания счетчика), соответствующий одному импульсу;  $V$  — объем жидкости, заключенной в калиброванном участке ТПУ, приведенный к давлению и температуре у счетчика.

При аттестации и поверке ТПУ определяют объем калиброванного участка „петли” с помощью образцовых мерников или весов и оценивают соответствующие поправки на температуру и давление рабочей жидкости.

ТПУ имеют существенные преимущества перед другими установками, с помощью которых поверяют счетчики количества промышленных жидкостей: высокую степень автоматизации (включая и автоматизированные расчеты погрешности с помощью встроенных мини-компьютеров); возможность поверять счетчики в реальных эксплуатационных условиях (для этого достаточно „встроить” ТПУ непосредственно в технологическую линию); повышенную точность вследствие исключения ошибок, вызываемых налипанием жидкости, пуском и остановкой счетчика в процессе поверки, испарением рабочей жидкости и отсчетом по шкале счетчика; простую конструкцию и пригодность для поверки как объемных, так и скоростных счетчиков любых калибров и на любой жидкости (что обеспечивается специальными покрытиями внутренней поверхности „петли” и выбором материала поршня).

Весовые испытательные установки отличаются от объемных тем, что вместо мерных баков для измерения количества жидкости в них применяют весы. На весах расположен резервуар, заполняемый во время опыта рабочей жидкостью. Объем резервуара выбирают, исходя из тех же соображений, что и объем мерного бака в объемных испытательных установках.

Резервуар оптимальной (с точки зрения минимизации погрешности установки) конструкции показан на рис. 117. Резервуар представляет собой прямоугольный двухкамерный сосуд. Рабочая жидкость подводится в наружный целевой короб 5 и по его стенкам стекает во внутреннюю камеру 4 спокойным пленочным потоком. Вследствие этого исключается возможность насыщения рабочей жидкости воздухом, пенообразования и выплескивания. Кроме того, большая протяженность внутренних стенок короба обеспечивает строго постоянный напор в подводящем трубопроводе 3. Подводящий трубопровод имеет разъемное соединение 2. Иногда вместо разъемных соединений применяются гибкие шланги, жесткость которых столь мала, что не сказывается на чувствительности весов 1.

Вы правы.

Динамическая ошибка интегрирующих скоростных счетчиков, датчик которых реагирует на мгновенный расход, будет значительно больше, чем объемных счетчиков, отмеряющих определенные объемные порции потока.

Если Вы столь же правильно ответили на все предыдущие вопросы, путь в метрологи-расходомерщики Вам на 80 % открыт.

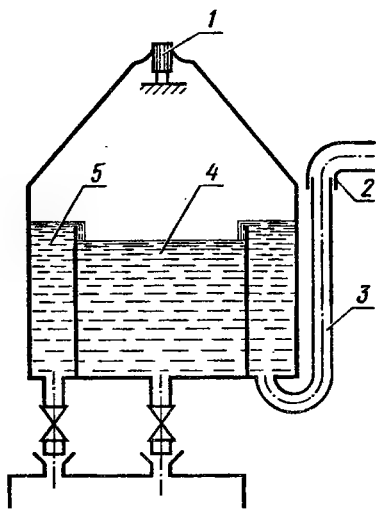


Рис. 117. Двухкамерный весовой резервуар

Двукратное взвешивание бака (опорожненного и заполненного рабочей жидкостью) полностью устраняет влияние налипания жидкости на стенки резервуара и на точность весовых установок. Поэтому весовые испытательные установки применяют для жидкостей любой вязкости. Однако проверка счетчиков на весовых установках более сложна, чем на объемных, так как требует точных измерений плотности и температуры рабочей жидкости для пересчетов измеренной весами массы на объемное количество протекшей через счетчики жидкости.

При правильном проектировании, изготовлении, качественной проверке и нормальной эксплуатации весовых испытательных установок их предельная погрешность может быть доведена до  $\pm 0,05\%$ . При этом для измерения массы залитой в резер-

вуар жидкости следует применять образцовые гидравлические весы, для измерения плотности рабочей жидкости в весовом резервуаре — образцовый денсиметр 1-го разряда с погрешностью  $\pm 0,02\%$  и для измерения температуры жидкости в весовом резервуаре и в трубопроводе перед поверяемым счетчиком — термометры с ценой деления  $0,1^\circ\text{C}$ .

## 10.2. Проверка испытательных установок для счетчиков количества жидкостей

Все испытательные установки, предназначенные для проверки счетчиков количества жидкостей, в свою очередь подлежат обязательной государственной проверке. В операции проверки входят: внешний осмотр; проверка герметичности мерного бака для объемных установок или весового резервуара для весовых; проверка шкалы мерного бака для объемных

установок или поверка весов для весовых; поверка устройства для измерения расхода (указателя расхода).

При внешнем осмотре установки проверяют ее соответствие основным требованиям, изложенным в НТД, чистоту мерного бака или весового резервуара, качество их окраски.

Герметичность мерного бака проверяют следующим образом: закрывают сливное устройство и заполняют бак водой (или керосином) примерно до середины шкалы. Затем измеряют температуру термометром с ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ , отмечают на шкале положение уровня и закрывают верх бака крышкой. По истечении 3 ч повторно измеряют температуру жидкости и вновь отмечают положение уровня. Мерник считают герметичным, если отметки на шкале не будут отличаться больше чем на величину изменения объема, вызванную изменением температуры жидкости.

Герметичность весового резервуара проверяют, двукратно взвешивая резервуар, полностью заполненный водой (или керосином). Время выдержки при этом такое же, как и для мерных баков, т. е. 3 ч. Резервуар считают герметичным, если абсолютная разность результатов первоначального и повторного взвешиваний не превышает погрешности весов.

Шкалу мерных баков поверяют с помощью образцовых мерников 1-го разряда или весовым способом, сливая или наливая в мерные баки определенные объемные (соответствующие номинальному объему образцового мерника) или весовые (измеренные на образцовых весах) порции воды. Номинальный объем образцовых мер или предельную нагрузку образцовых весов, используемых для поверки шкал мерных баков, выбирают таким образом, чтобы продолжительность поверки (без ущерба для ее достоверности) была минимальной. Обычно для поверки используют образцовые меры, номинальный объем которых равен или более  $1/50$  полного объема поверяемого мерного бака. Перед поверкой мерный бак смачивают рабочей жидкостью установки, а образцовую меру (или резервуар образцовых весов) — водой.

При проведении поверки шкалы мерного бака необходимо тщательно следить за температурным режимом помещения, в котором проводят поверку. Не допускается изменение температуры воздуха в этом помещении более чем на  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  в течение всего поверочного цикла. Кроме того, номинальная температура воздуха в помещении должна быть  $(20 \pm \pm 5)^{\circ}\text{C}$ .

Весы, применяемые в весовых испытательных установках, проверяют в соответствии с действующими стандартами и методическими указаниями на поверку.

Поверка устройств для измерения расхода состоит в определении погрешности показаний указателя расхода при работе установки на рабочей жидкости. Показания проверяют на наибольшей отметке шкалы указателя, а также на двух других отметках (по выбору поверителя). Поверку осуществляют следующим образом. На испытательную установку монтируют счетчик с известной погрешностью показаний и пределом измерений, обеспечивающим наибольший (по шкале указателя) рабочий расход

установки. После промывки счетчика и трубопроводов установки убеждаются, что при закрытом регулировочном кране или задвижке уровень манометрической жидкости в указателе расхода находится на нулевом уровне (нулевой отметке указателя). Затем открывают регулировочный кран и устанавливают по шкале указателя наибольший расход.

В тот момент, когда большая стрелка счетчика будет проходить нулевую отметку, включают ручной секундомер и определяют время, затраченное на пропуск через счетчик количества жидкости, соответствующее не менее чем двум оборотам большой стрелки. По показаниям секундомера и счетчика вычисляют действительный максимальный расход жидкости через установку и сравнивают его с расходом, зафиксированным на наибольшей отметке шкалы указателя. Устройство считают годным, если относительная разность показаний по шкале указателя и значения расхода, определенного по стрелке счетчика и секундомеру, лежит в пределах  $\pm 2\%$  максимального расхода на установке.

Если отсутствует счетчик, устройство для измерения расхода поверяют непосредственно по мерному баку установки, определяя по секундомеру продолжительность прохождения уровня рабочей жидкости в баке между двумя определенными (в зависимости от поверочного расхода) отметками его шкалы.

#### К контрольному вопросу № 17

Ваши знания материала, относящиеся к счетчикам количества жидкостей, и Ваша интуиция измерителя-прибориста еще не на высоте.

Разберитесь, как следует в принципах действия скоростных и объемных счетчиков (повторите относящийся к ним материал учебника) и наглядно представьте себе их работу.

### 10.3. Основы поверки счетчиков количества жидкостей

Метрологическая часть поверки счетчиков состоит в определении относительных погрешностей их показаний по формуле

$$\delta = \left[ \frac{V_c - V_d}{V_d} + \beta_{ж}(t_1 - t_2) \right] \cdot 100\%, \quad (10.3)$$

где  $V_c$  — объем жидкости, отсчитанный по счетчику;  $V_d$  — объем жидкости, измеренный установкой;  $\beta_{ж}$  — коэффициент объемного расширения жидкости;  $t_1$  — температура жидкости в мерном баке или весовом резервуаре установки;  $t_2$  — температура жидкости непосредственно у счетчика.

На весовых испытательных установках объем жидкости  $V_d$  определяют как

$$V_d = \frac{M\Theta}{\rho}, \quad (10.4)$$

где  $M$  — масса жидкости, налитой в весовой резервуар, определенная по показаниям весов;  $\Theta = 1,001$  — коэффициент, учитывающий потерю веса в воздухе;  $\rho$  — плотность жидкости в резервуаре.

Погрешности показаний счетчика вычисляются на трех поверочных расходах 100, 50 и 10 % от верхнего предела измерений.

Количество жидкости, пропускаемое через счетчик за время поверочного пропуска, должно быть не менее количества, соответствующего 500 наименьших делений его счетного указателя. При этом продолжительность пропуска жидкости должна быть не менее 2 мин.

При поверке необходимо тщательно следить за наличием воздуха в рабочей жидкости и температурным режимом установки. Если в смотровом сосуде установки появятся пузырьки воздуха, то поверку необходимо прекратить до устранения причин подсоса воздуха.

Это общие положения по поверке счетчиков жидкостей, изложенные в соответствующих инструкциях и методических указаниях, пригодны лишь для поверки счетчиков на рабочих жидкостях, т. е. на тех средах, для измерения количества которых предназначены счетчики.

Если рабочие жидкости взрывоопасны, токсичны, агрессивны, обладают большой вязкостью или высокой температурой, поверка счетчиков непосредственно на этих жидкостях сопряжена с большими техническими или экономическими трудностями. В этих случаях объемные счетчики возможно поверять на жидкостях-заменителях, которые выбирают из соображений: безвредности и безопасности для обслуживающего персонала, нейтральности по отношению к материалам, из которых изготовлены узлы испытательной установки, малой испаряемости, недифицитности и невысокой стоимости, возможности быстрой и полной очистки счетчика после поверки.

Из приведенного видно, какие огромные преимущества имеет поверка счетчиков, применяемых в химической промышленности, атомной энергетике, ракетной технике и т. п., на жидкостях-заменителях, и как важно, уметь правильно осуществлять эту „имитационную” поверку.

Методика этой поверки (базирующаяся на основных положениях общей теории объемных счетчиков жидкостей) сводится к определению погрешностей показаний счетчиков на жидкостях-заменителях с последующим пересчетом их на реальную измеряемую среду (для измерения количества которой предназначен счетчик). При этом пересчетные формулы имеют вид:

для шестеренчатых и дисковых счетчиков калибром до 80 мм:

для рабочих жидкостей вязкостью  $\mu \geq 21$  П (перепад давления на счетчике практически целиком определяется потерей напора на чисто жидкостное трение в механизме счетчика)

$$\delta_p = C_0 - (C_0 - \delta_3) \frac{Re_{op}}{Re_{o3}}, \quad (10.5)$$

где  $\delta_p$  — погрешность показаний счетчика на рабочей измеряемой среде;  $\delta_3$  — погрешность показаний на жидкости-заменителе;  $C_0$  — постоянная счетчика, зависящая от его конструктивных параметров;  $Re_{o3}$ ,  $Re_{op}$  — числа Рейнольдса, приведенные к зазору в счетчике и определяемые в зависимости от вязкости жидкости-заменителя и вязкости рабочей среды;

для рабочих жидкостей вязкостью  $0,20 \text{ П} \leq \mu < 21 \text{ П}$  (перепад давления на счетчике определяется как жидкостным, так и граничным трением в его механизме)

$$\delta_p = C_0 - (C_0 - \delta_3) \left( \frac{\mu_3}{\mu_p} \right)^n, \quad (10.6)$$

где  $\mu_3$ ,  $\mu_p$  — динамические коэффициенты вязкости жидкостей,  $\text{П}$ ;  $n$  — показатель степени, зависящий от типа счетчика и равный для шестеренчатых счетчиков 0,6 и для дисковых счетчиков — 0,2;

для рабочих жидкостей вязкостью  $\mu < 0,20 \text{ П}$  (перепад давления на счетчике определяется граничным и сухим трением в его механизме)

$$\delta_p = C_0 - (C_0 - \delta_3) \times \frac{\text{Re}_{\text{оп}}^{k_p} \text{Re}_p^{1-k_p} + m_p \left( \frac{dG}{Q \mu_p} \right)^{1,27}}{\text{Re}_{\text{оз}}^{k_3} \text{Re}_3^{1-k_3} + m_3 \left( \frac{dG}{Q \mu_3} \right)^{1,27}}, \quad (10.7)$$

где  $\text{Re}$  — число Рейнольдса, отнесенное к калибру счетчика,  $d$  — характерный диаметр поршня счетчика, см;  $G$  — вес поршня, дин;  $Q$  — расход жидкости,  $\text{см}^3/\text{с}$ ;  $m$  и  $k$  — величины, зависящие от вязкости рабочей жидкости, жидкости-заменителя и числа Рейнольдса.

Для того, чтобы воспользоваться пересчетными формулами (10.5) — (10.7), необходимо предварительно определить постоянную счетчика  $C_0$ . Наиболее точный метод определения  $C_0$  состоит в том, что счетчик поверяют на двух жидкостях-заменителях с различными вязкостями. Затем, воспользовавшись простейшей пересчетной формулой (10.6), в которую вместо параметров рабочей среды подставляют известные (определенные в процессе поверки) параметры второй жидкости-заменителя, рассчитывают  $C_0$ . Исходя из целесообразности использования для расчетов  $C_0$  формулы (10.6), а также учитывая вышеизложенные требования, в качестве поверочных жидкостей-заменителей для объемных счетчиков применяют воду, керосин и подобные им жидкости с вязкостью  $0,01 \pm 0,002 \text{ П}$ , трансформаторное и соляровое масла вязкостью  $0,20 \pm 0,03 \text{ П}$ .

Пересчетная формула для счетчиков с кольцевым поршнем имеет вид

$$\delta_p = C - (C - \delta_3) \left( \frac{\mu_3}{\mu_p} \right)^{k_k}. \quad (10.8)$$

Причем, величина  $C$  и показатель степени  $k_k$  определяются уравнениями

$$C = \frac{\delta_2 \delta'_1 - \delta_1 \delta'_2}{(\delta_2 - \delta_1) - (\delta'_2 - \delta'_1)} \quad (10.9)$$

$$\text{и} \quad k_k = \frac{\lg \left( \frac{\delta_2 - C}{\delta_1 - C} \right)}{\lg \left( \frac{\mu_1}{\mu_2} \right)}, \quad (10.10)$$

где  $\delta_1$  и  $\delta'_1$  — погрешности счетчика на поверочной жидкости вязкостью  $\mu_1$ ;  $\delta_2$  и  $\delta'_2$  — погрешности счетчика на поверочной жидкости вязкостью  $\mu_2$ .



При этом  $\delta_1$  и  $\delta_2$  соответствуют номинальному расходу через счетчик, а  $\delta'_1$  и  $\delta'_2$  — любому другому расходу, при котором  $(\delta'_2 - \delta'_1)$  отличается от  $(\delta_2 - \delta_1)$  не менее чем на 0,5 %.

Таким образом, в данном случае показатель степени  $k_k$  не принимают постоянным для типа счетчика (как это было в случае шестеренчатых и дисковых счетчиков), а рассчитывают по уравнению (10.10), характеризующему качество изготовления и сборки конкретного поверяемого экземпляра счетчика, что, естественно, превышает достоверность „иммитационной” поверки на жидкостях-заменителях.

При поверке счетчиков, предназначенных для работы в условиях низких или высоких температур (значительно отличающихся от  $20 \pm 10^\circ \text{C}$ ), необходимо дополнительно корректировать расчетные погрешности показаний, полученные по формулам (10.5), (10.6), (10.7) или (10.8). Данные формулы учитывают лишь различие вязкостей поверочной (в условиях поверки) и рабочей (в условиях эксплуатации счетчика) жидкостей, но не характеризуют изменение погрешности, связанное с термическим изменением рабочих зазоров счетчика.

С учетом изложенного погрешность показаний счетчиков в рабочих условиях необходимо дополнительно корректировать по формуле

$$\delta'_p = \frac{1}{1 + 3\alpha\Delta t} (\delta_p - 300\alpha\Delta t), \quad (10.11)$$

где  $\delta_p$  — погрешность показаний, вычисленная по формулам (10.5), (10.6), (10.7) или (10.8),  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала камеры счетчика,  $\Delta t$  — разность температур в условиях работы и поверки счетчика.

Как следует из вышеизложенного, поверка счетчиков на жидкостях-заменителях с последующим пересчетом их погрешностей на рабочую среду сопряжена с некоторыми техническими (поверка на двух жидкостях различной вязкости) и расчетными трудностями. Но иначе и быть не может, так как в данном случае поверка фактически сводится к моделированию чрезвычайно сложных физических процессов, происходящих в работающем счетчике.

#### Контрольный вопрос № 18

Шестеренчатый счетчик калибром 40 мм, предназначенный для измерения с погрешностью  $\pm 0,5$  % количества эфирных масел (вязкостью 0,5 П), был поверен на двух жидкостях-заменителях вязкостью соответственно 0,01 и 0,2 П. При этом были получены следующие данные — см. таблицу.

| Пропуск | Вязкость поверочной жидкости, П | Поверочный расход, м <sup>3</sup> /ч | Количество жидкости, отчитанное счетчиком, л |
|---------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1       | 0,01                            | 15                                   | 498                                          |
|         | 0,20                            |                                      | 502                                          |
| 2       | 0,01                            | 15                                   | 499,5                                        |
|         | 0,20                            |                                      | 502,25                                       |
| 3       | 0,01                            | 15                                   | 498,5                                        |
|         | 0,20                            |                                      | 502,5                                        |

Действительное количество жидкости, определенное по установке, равно 500 л.

Определите, следует ли забраковать счетчик или признать его годным для дальнейшей эксплуатации.

Если Вы решите, что счетчик годен для эксплуатации, — см. с. 255, если — не годен — см. с. 262.

## Глава 11. СЧЕТЧИКИ КОЛИЧЕСТВА ГАЗОВ

### 11.1. Счетчики ротационные

Ротационные газосчетчики предназначены для измерения больших количеств газа (до  $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). Они отличаются от газосчетчиков других типов меньшими габаритными размерами при одних и тех же пределах измерений и нечувствительностью к перегрузкам.

К недостаткам ротационных счетчиков относят повышенные обороты лопастных поршней и как следствие этого интенсивный износ рабочих органов.

Ротационный счетчик (рис. 118) состоит из корпуса, вращающихся лопастных поршней-роторов, передаточного и счетного механизмов, связанных с одним из роторов. Роторы приводятся во вращение под действием разности давлений газа, входящего через верхний входной патрубок и выходящего через нижний выходной патрубок. При вращении роторы обкатываются своими боковыми поверхностями, соприкасаясь с внутренней поверхностью камеры. Механизм вращения роторов аналогичен механизму вращения овальных шестерен шестеренчатых счетчиков количества жидкостей. Взаимное вращение роторов обеспечивается зацеплением зубчатых колес, насаженных на вал каждого ротора.

Объем газа, вытесненный за пол-оборота одного ротора, равен объему, ограниченному внутренней поверхностью корпуса и боковой поверхностью ротора, занимающего вертикальное положение. За полный оборот роторов вытесняется четыре таких объема.

При изготовлении ротационных счетчиков особое внимание обращают на легкость хода роторов и уменьшение неучитываемых утечек газа через счетчик. Легкость хода (качественный показатель малого трения в механизме, а следовательно, и малой потери давления на счетчике) обеспечивается установкой валов роторов на подшипники качения. Уменьшение же утечек газа достигается тщательной обработкой и взаимной подгонкой внутренней поверхности корпуса и трущихся по-

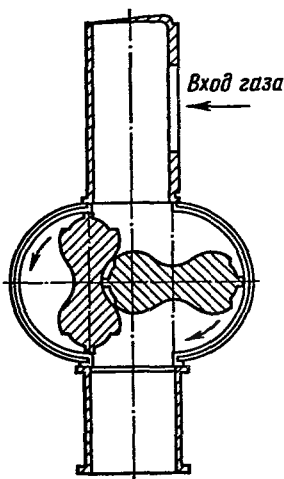


Рис. 118. Схема ротационного газосчетчика

верхностей роторов. Газ в ротационный счетчик подается сверху, поэтому взвешенные частицы не засоряют счетчик, а падают вниз.

Потери напора на ротационных счетчиках обычно не превышают 35—40 мм вод. ст., а погрешность показаний — 1 % в пределах 10—100 % номинального расхода. Показания счетчика регулируют сменой шестерен в редукторе счетного механизма.

Существуют ротационные газосчетчики с коррекцией показаний по давлению и температуре газа. Шкалу счетчика в этом случае градуируют в единицах объема, приведенного к нормальному состоянию газа.

## 11.2. Газосчетчики с измерительными мехами и барабанные газосчетчики

Газосчетчики с измерительными мехами применяют для учета небольших количеств чистых газов, потребляемых в основном для бытовых целей и в малых отопительных котельных.

Существуют газосчетчики с измерительными мехами нескольких конструктивных разновидностей. Приборы изготовляют с клапанным и золотниковым распределением. Причем, золотниковое распределение применяют в приборах с двумя измерительными мехами, а клапанное — как в приборах с двумя, так и с одним измерительным мехом.

Принципиальная схема газосчетчика с клапанным распределением показана на рис. 119. Основными частями счетчика являются корпус, га-

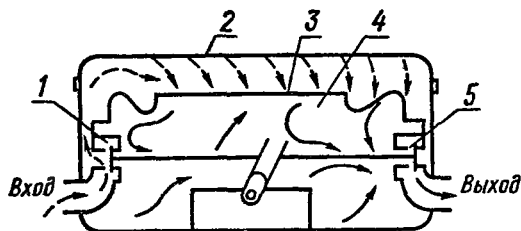


Рис. 119. Принципиальная схема газосчетчика с измерительными мехами и клапанным распределением

Перегородку выполняют в виде эластичной диафрагмы из кожи, ее заменителей или полихлорвинила. В центре диафрагмы укреплен металлический диск 3. Под действием разности давлений газа диафрагма (мех) растягивается или сжимается, и диск приобретает возвратно-поступательное движение. При этом клапаны газораспределительного механизма, связанные с подвижным мехом системой рычагов, автоматически переключаются. При переключении клапанов газ поочередно поступает то в одну, то в другую распределительную камеру.

За один ход подвижной перегородки вытесняется объем газа, равный объему измерительной камеры 4. Суммарное число ходов перего-

1 зораспределительный и счетный механизмы. Корпус представляет собой герметичный штампованный из жести цилиндр, имеющий внутри две газораспределительные камеры 1 и 5 с патрубками для присоединения счетчика к газопроводной сети. Камеры разделены измерительной подвижной перегородкой (мехом).

родки фиксируется счетным механизмом, связанным системой рычагов с диском 3. Механизм счетчика помещен в корпус 2.

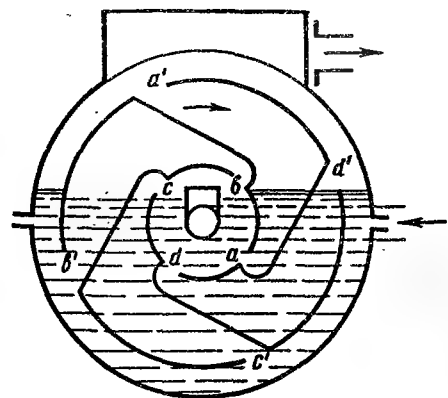
Необходимым условием нормальной работы счетчика является большая скорость срабатывания клапанов газораспределительного механизма, так как в момент их переключения газ протекает через счетчик, минуя измерительную камеру. Требуемое быстродействие клапанов обеспечивается подбором переключающей пружины соответствующей жесткости. Кроме быстродействия, для обеспечения нормальной (с гарантированной точностью) работы счетчика необходима также полная герметичность клапанов. Это достигается тем, что их седла изготавливают из эластичных материалов, а также качественной сборкой и юстировкой газораспределительного механизма. Наличие в газе взвешенных частиц и влаги может вызвать разгерметизацию клапанов, поэтому данные счетчики применяют лишь для измерения количества чистых сухих газов.

При качественном изготовлении и нормальной эксплуатации газосчетчика с измерительными мехами погрешность их показаний не превышает 2—3 %.

Для предохранения измерительной перегородки от коробления и потери эластичности газосчетчики с измерительными мехами устанавливают в отапливаемых помещениях. По той же причине не рекомендуется устанавливать их в непосредственной близости от газовых плит и других источников тепла, а также в помещениях с высокой температурой.

Так как корпуса газосчетчиков с измерительными мехами изготовляют из тонкой листовой жести, и они не могут выдерживать значительных усилий, при монтаже счетчиков особое внимание обращают на отсутствие натягов и перекосов в подводящих трубопроводах.

Основными элементами барабанного газосчетчика (рис. 120) является корпус, барабан с измерительными камерами и счетный механизм.



Металлический барабан, имеющий четыре измерительные камеры одинаковой емкости, погружен в затворную жидкость. Под действием разности давлений газа во входном и выходном патрубках счетчика вращается барабан, при этом газ вытесняется жидкостью из камер барабана. Вращение барабана передается счетному механизму. Один полный оборот барабана, зафиксированный счетным механизмом, соответствует суммарному объему всех четырех камер.

Необходимым условием нормальной работы барабанного счетчика является определенное

Рис. 120. Схема барабанного газосчетчика

(выше оси барабана) и строго постоянное положение уровня затворной жидкости. Для наблюдения за положением уровня затворной жидкости барабанные газосчетчики снабжают водомерными устройствами. Кроме того, чтобы счетчик работал с гарантированной точностью, необходимо устанавливать его строго горизонтально. Для этого на корпус прибора монтируют уровни.

В качестве затворной жидкости чаще всего применяют чистую воду. При измерениях количества газов с отрицательными температурами применяют специальные незамерзающие затворные жидкости.

Номинальный расход барабанного счетчика определяют произведением измерительного объема на предельно допустимое число оборотов барабана. Обычно число оборотов барабана у счетчиков данного типа не превышает 80–100 об/ч. Повышение числа оборотов приводит к существенным колебаниям уровня затворной жидкости и, в конечном счете, к резкому снижению точности. Следовательно, для увеличения предела измерений этих счетчиков приходится увеличивать объем измерительных камер, и счетчики получаются громоздкими. Из-за этого барабанные газосчетчики не применяют для промышленных измерений, а используют в основном при лабораторных исследованиях и в поверочной практике, т. е. там, где требуется высокая точность измерений.

Погрешность барабанных газосчетчиков лежит в пределах  $\pm (0,2-0,5) \%$ .

#### **К контрольному вопросу № 18**

Вы не разобрались в методике поверки объемных счетчиков на жидкостях-заменителях. Четкое понимание этого достаточно сложного вопроса поможет Вам в дальнейшем хорошо освоить технику метрологического обслуживания объемных счетчиков жидкостей. Поэтому советуем Вам повторить заново разд. 8.3, проанализировать причину своей ошибки и лишь после этого изучать последующие главы учебника.

## **Глава 12. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОВЕРКИ СЧЕТЧИКОВ КОЛИЧЕСТВА ГАЗОВ**

### **12.1. Принцип действия и основные конструктивные элементы испытательных установок для счетчиков количества газов**

Принципиальная схема испытательной установки для поверки газосчетчиков показана на рис. 121. Установка состоит из колокольного газового мерника 2-го разряда, компрессора, регулировочного устройства, указателя расхода, а также ряда устройств и элементов (отмеченных на схеме), необходимых как для нормальной работы установки, так и для полной и качественной поверки счетчиков.

Газовый мерник (рис. 122) предназначен для вытеснения строго определенных объемных порций газа, подаваемых на поверяемый счетчик, при определенном давлении и расходе. Мерник состоит из измери-

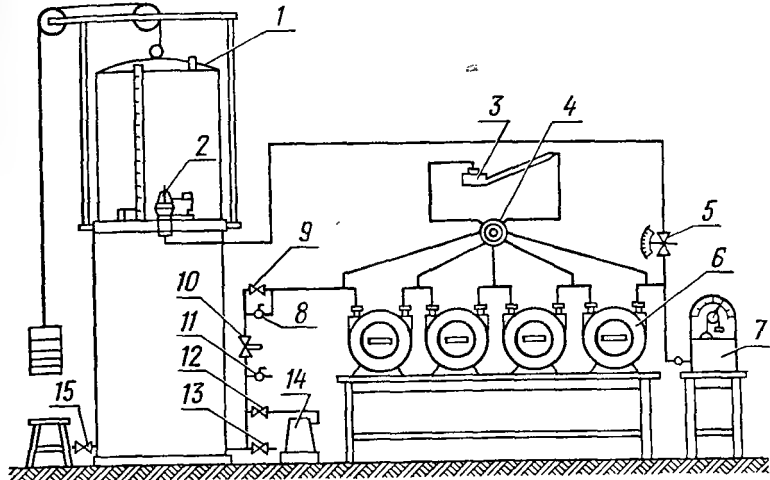


Рис. 121. Схема установки для поверки газосчетчиков:

1 — колокол мерника; 2 — клапан автоматического останова; 3 — микроманометр; 4 — переключатель микроманометра; 5 — регулировочный кран; 6 — поверяемый газосчетчик; 7 — указатель расхода; 8 — обходной кран; 9 — проходной кран; 10 — кран для приема воздуха из помещения; 11 — кран для подсоединения манометра; 12 — приемный кран; 13 — пробка; 14 — компрессор; 15 — кран для слива воды из мерника

тельного колокола 2, рейки со шкалой 3, указателя 4, резервуара с водой 5, зажимного устройства 6 и приспособления для поддержания постоянного давления под колоколом при его погружении в резервуар. Измерительный колокол представляет собой полый цилиндр с верхним сферическим днищем. Колокол подвешен на цепи или тросе 1 и частично уравновешен противовесом 8 с дополнительными грузами 7. При работе установки колокол под действием собственного веса погружается в воду, находящуюся в резервуаре 5. При этом из пространства под колоколом вытесняется объем воздуха, пропорциональный площади внутреннего (пустотелого) сечения колокола и его перемещению по вертикали. Вертикальное перемещение колокола обеспечивается направляющими штангами и роликами. Кроме того, применение направляющих штанг и роликов обеспечивает постоянный зазор между стенками колокола и резервуара с водой, а также между рейкой со шкалой, укрепленной на колоколе, и указателем, укрепленным на резервуаре. Равномерность шкалы мерника обуславливается соответствующими технологическими допусками на конусность и овальность сечения колокола, которые не должны превышать 0,1 %.

Точность отсчета положения колокола по шкале рейки, характеризующая точность определения объема воздуха, вытесненного из-под колокола, должна лежать в пределах  $\pm 0,5$  мм.

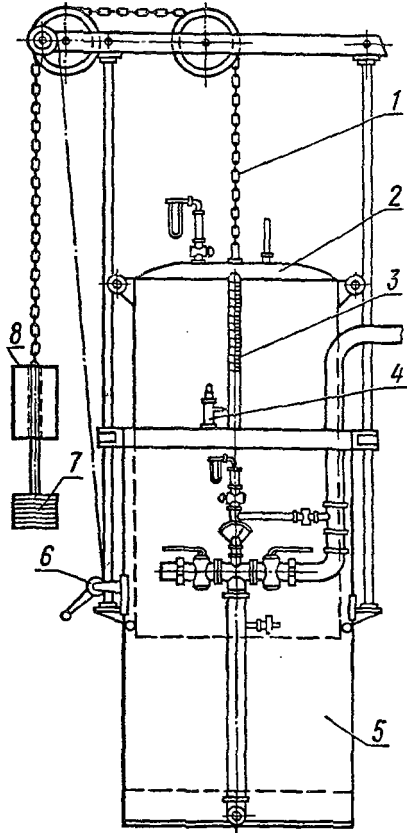


Рис. 122. Газовый мерник испытательной установки

Для увеличения точности отсчета указатель, обычно представляющий собой ножевую стрелку, может быть снабжен нониусом или оптическим визирным приспособлением.

Рабочий объем колокола выбирают равным объемному количеству воздуха, протекающему через поверяемый счетчик при наибольшем поверочном расходе за 3 мин.

Газосчетчики поверяют, как правило, при рабочих (эксплуатационных) давлениях газа. На большинстве промышленных газопроводов рабочее избыточное давление составляет 40–80 мм вод. ст. Это давление и принято за нормальное при проверке газосчетчиков.

Давление под колоколом создается его весом и регулируется сменой грузов противовеса. Если не принять никаких специальных мер, то при погружении колокола в воду вес его за счет изменения выталкивающей „архимедовой” силы также будет изменяться, а следовательно, будет меняться и давление газа под колоколом. Для обеспечения постоянства давления под колоколом при работе установки мерники снаб-

жаются весовыми, рычажными или объемными устройствами, автоматически поддерживающими постоянным вес колокола при его погружении в воду.

Весовое устройство, показанное на рис. 122, основано на изменении длины цепи со стороны колокола и со стороны подвески противовеса. При опускании колокола длина цепи противовеса уменьшается, а длина цепи колокола растет. Вызванное этими изменениями длины различных участков цепи перераспределение их весов компенсирует потерю в весе колокола.

Если  $\Delta G$  — вес воды, вытесненной при опускании колокола на единицу длины (например, на 1 м), то естественно, что для компенсации изменения давления под колоколом вес единицы длины цепи должен быть равен  $g = \Delta G/2$ .

Рычажное устройство (рис. 123) основано на добавочном утяжелении колокола моментом от веса гирьки, укрепленной на переменном плече  $a$  улитки.

При расчете рычажного устройства определяют профиль улитки, т. е. определяют зависимость  $r = f(\varphi)$ , где  $r$  — текущий радиус улитки,  $\varphi$  — угол поворота улитки, закрепленной на ролике противовеса.

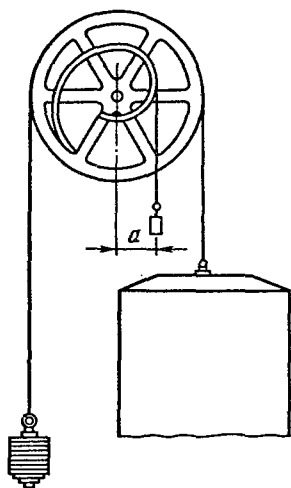


Рис. 123. Рычажное компенсирующее устройство

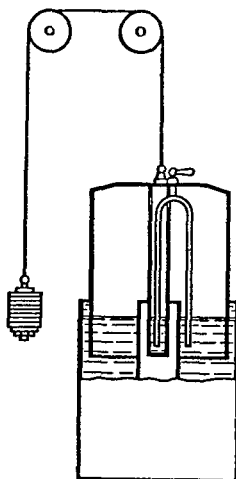


Рис. 124. Объемное компенсирующее устройство

При опускании колокола на величину  $\Delta h$  момент веса колокола на плече  $R$  ролика противовеса за счет выталкивающей силы изменится на

$$\Delta M = \Delta h F_K \gamma R, \quad (12.1)$$

где  $F_K$  — площадь кольцевого сечения колокола,  $\gamma$  — объемный вес воды, заполняющей мерник.

Для компенсации изменения веса колокола необходимо, чтобы

$$\Delta M = \Delta r g_r, \quad (12.2)$$

где  $g_r$  — масса гирьки рычажного устройства.

Из формул (12.1) и (12.2), приняв во внимание, что  $\Delta h = R\varphi$ , получим расчетную зависимость для определения необходимого профиля улитки

$$r = \varphi R^2 \frac{F_K \gamma}{g_r}. \quad (12.3)$$

Объемное компенсирующее устройство (рис. 124) состоит из цилиндрического сосуда с доньшком, прикрепленным к колоколу, и сифонной трубки, один конец которой опущен в цилиндрический сосуд, а дру-



гой в резервуар мерника. При опускании колокола вытесняемая им жидкость по сифонной трубке переливается в цилиндрический сосуд. Для компенсации изменения давления под колоколом сечение цилиндрического сосуда  $F_c$  (с учетом сечения сифонной трубки) должно быть таким, чтобы вес воды, переливающейся в сосуд из резервуара мерника, был равен весу воды, вытесненной колоколом, т. е.

$$\Delta h F_{\kappa} \gamma = (\Delta h + \Delta h_y) F_c \gamma, \quad (12.4)$$

где  $\Delta h_y$  — возрастание уровня жидкости в резервуаре при опускании колокола на величину  $\Delta h$ .

Приняв во внимание, что  $\Delta h_y = \Delta h F_{\kappa} / F_p$ , где  $F_p$  — площадь свободной поверхности жидкости в резервуаре мерника, на основании формулы (12.4) получим искомую площадь сосуда

$$F_c = \frac{F_p F_{\kappa}}{F_p - F_{\kappa}}. \quad (12.5)$$

Сифонное устройство в отличие от весового и рычажного не только компенсирует потерю веса колокола, но и поддерживает постоянство уровня воды в резервуаре мерника.

Колебания давления воздуха под колоколом могут быть вызваны также и трением при движении роликов по направляющим штангам и перемещении цепи противовеса по подпятникам. Для уменьшения трения ролики свободно насаживаются на оси, которые крепятся к стенкам колокола с помощью упругих пластин. Между направляющими штангами и роликами должен быть небольшой зазор, а штанги смазываться вазелином. Подпятники для цепи или троса противовеса имеют шариковые подшипники с хорошей смазкой. Звенья цепи или трос выбирают достаточно гибкими.

Выполнение всех указанных конструктивных и технологических требований обеспечивает постоянство давления под колоколом при работе установки  $\pm 5$  мм вод. ст. Для измерения и контроля давления применяют стеклянные микроманометры с наклонной трубкой.

Существенно на работу газового мерника влияет нестабильность температуры окружающего воздуха во времени и непостоянство температуры по высоте колокола. Изменение температуры влечет за собой изменение объема вытекающего из-под колокола воздуха. Вследствие этого при работе установки не допускаются колебания температуры воды, заполняющей резервуар мерника, и температуры окружающего воздуха более чем на  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  во время проведения опыта и по высоте колокола. Кроме того, температуры воды и воздуха не должны отличаться более чем на  $0,5^\circ\text{C}$ . Столь высокие требования к температурному режиму работы мерника обуславливают необходимость тщательного термостатирования лабораторных помещений для поверки газосчетчиков с помощью колокольных испытательных установок.

Конструкция и методы расчета устройств для регулирования расхода (регулирующих насадок с указателями расхода) на газомерных испы-

тательных установках не отличаются от регулировочных устройств испытательных установок для счетчиков жидкостей.

Для автоматического прекращения подачи воздуха из-под колокола в поверяемый счетчик применяют пружинные клапаны, срабатывающие от контактных устройств, заблокированных с перемещающимся колоколом.

Для поверки газосчетчиков большой производительности (более  $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) находят применение автоматизированные газомерные установки с двумя колоколообразными мерниками, работающими в непрерывном режиме. Пока один колокол опускается и вытесняет воздух, другой, поднимаясь, заполняется воздухом от непрерывно действующей воздушной заслонки.

В последние годы существенное развитие в отечественной и зарубежной практике получают газомерные трубопоршневые установки, установки с жидкостным вытеснением газа и другие.

## **12.2. Поверка испытательных установок для газосчетчиков**

Установки с колокольными мерниками, предназначенные для поверки газосчетчиков, после изготовления, ремонта и установленного срока эксплуатации подлежат обязательной государственной поверке.

Метрологическая часть поверки установок сводится к оценке погрешностей указателей расхода и показаний газового мерника.

В основе поверки указателей расхода газомерных установок лежат те же принципы, что и в основе поверки указателей расхода испытательных установок для жидкостных счетчиков.

Поверка образцового газового мерника заключается в проверке его герметичности и установлении правильности нанесения отметок на шкале колокола. При проверке мерника на герметичность нагнетают воздух под колокол до тех пор, пока он не займет верхнего положения. Закрепляют цепь противовеса с тем, чтобы при наличии утечки колокол оставался неподвижным. При этом о герметичности мерника судят по показаниям микроманометра, подсоединенного к выходному газопроводу установки (см. рис. 122). Если в течение 2 мин положение мениска манометрической жидкости, заполняющей трубку дифманометра, не изменится, мерник считается герметичным.

Правильность нанесения отметок на шкале колокола проверяют, измеряя количество воздуха, выходящего из-под колокола, образцовыми газовыми мерниками 1-го разряда, номинальный объем которых определен весовым методом с погрешностью не более 0,03 %.

При выборе объема и количества образцовых мерников следует исходить из допустимой продолжительности поверки всей шкалы мерника, которая не должна быть более 1 ч. В процессе поверки поддерживают равенство и постоянство температур воздуха и воды в пределах  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Образцовый газовый мерник 1-го разряда показан на рис. 125. Колбу 2 мерника через кран 7, соединенный гибким шлангом со специаль-

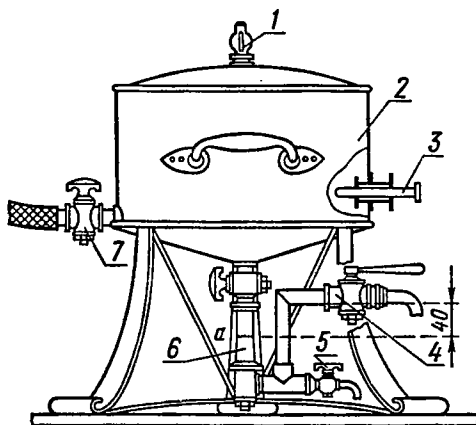


Рис. 125. Образцовый газовый мерник 1-го разряда

уровень не установится на отметке 0, нанесенной на толстостенной стеклянной трубке 6. Обычно эта отметка наносится на 40 мм ниже уровня сливной трубы, что соответствует давлению воздуха под колоколом, равному 40 мм вод. ст. Таким образом, количество воздуха, поступившего в мерник, равно объему вытекшей из мерника воды. Если объем мерника известен (его определяют в процессе аттестации самого мерника и подгоняют под номинальное значение при помощи регулирующего цилиндра 3), можно подсчитать погрешности отметок шкалы колокола. Для полного опорожнения мерника служит кран 5.

ным хранилищем, предварительно заполняют водой. Полный залив колбы контролируют при помощи ниппельного крана 1, установленного на шарообразной крышке мерника. Затем мерник при помощи резиновой трубки, накидываемой на ниппель крана 1, соединяют с пространством под поверяемым колоколом. Если после этого открыть кран 4, то вода из колбы будет вытекать, и колба будет заполняться воздухом, поступающим из-под колокола. Вода из колбы будет вытекать до тех пор, пока ее уро-

### 12.3. Основы поверки газосчетчиков

В процессе поверки газосчетчиков определяют соответствие их герметичности, чувствительности, потерь давления, колебаний потерь давления (мигания) и погрешностей показаний требованиям нормативных документов.

При проверке герметичности счетчика компрессором или воздуходувкой закачивают в него воздух с избыточным давлением, равным  $2 \text{ кгс/см}^2$  для ротационных газосчетчиков,  $0,075 \text{ кгс/см}^2$  — для газосчетчиков с мерными мехами;  $0,12 \text{ кгс/см}^2$  — для барабанных газосчетчиков и наблюдают за давлением воздуха по показаниям манометров. Если в течение 5 мин показания манометров не изменятся, то счетчик считается герметичным.

Чувствительность газосчетчиков проверяют на испытательных установках. При этом на установке создают расход газа, соответствующий 2,5 % номинального расхода для ротационных газосчетчиков,  $0,0375 \text{ м}^3/\text{ч}$  — для газосчетчиков с мерными мехами и номинальным расходом  $2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

0,060 м<sup>3</sup>/ч — для газосчетчиков с мерными мехами и номинальным расходом 6 м<sup>3</sup>/ч, 1 % номинального расхода — для барабанных счетчиков.

Прибор считают удовлетворяющим требованиям по чувствительности, если большая стрелка или наименьший ролик счетного механизма при указанных значениях расхода на установке (контролируемых по показаниям микроманометра) будут вращаться.

Методика поверки погрешности показаний газосчетчиков на испытательных установках не отличается от методики, принятой при поверке счетчиков количества жидкостей на рабочих средах.

Разность показаний счетчиков и испытательной установки для метрологически исправных счетчиков (признаваемых по результатам поверки годными) не должна превышать 2 % при расходах 100 и 50 % номинального и 3 % при расходе 10 % номинального.

Потери давления на счетчике и колебания этих потерь (мигания) при его работе определяют при помощи микроманометра и переключательно-го крана, соединяющего с микроманометром попеременно входной и выходной патрубки работающего счетчика.

Допустимые потери давления и колебания потери давления при номинальных расходах для различных типов газосчетчиков составляют: для ротационных газосчетчиков 30 и 3 мм вод. ст. соответственно; для барабанных газосчетчиков 8 и 3 мм вод. ст.;

для газосчетчиков с мерными мехами 11 и 5 мм вод. ст. при номинальных расходах до 6 м<sup>3</sup>/ч и 20 и 8 мм вод. ст. при номинальных расходах свыше 6 м<sup>3</sup>/ч

#### К контрольному вопросу № 18

Проанализировав данные, приведенные в таблице, нетрудно убедиться, что результаты поверки счетчика на жидкостях-заменителях могут быть представлены следующим образом:

| Пропуск | Вязкость поверочной жидкости, П | Относительная погрешность показаний счетчика на жидкостях-заменителях, % |
|---------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1       | 0,01                            | -0,40                                                                    |
|         | 0,20                            | +0,40                                                                    |
| 2       | 0,01                            | -0,10                                                                    |
|         | 0,20                            | +0,45                                                                    |
| 3       | 0,01                            | -0,30                                                                    |
|         | 0,20                            | +0,50                                                                    |

Формула (10.6), приведенная к виду

$$C_0 = \frac{\delta_p - \delta_3 \left( \frac{\mu_3}{\mu_p} \right)^n}{1 - \left( \frac{\mu_3}{\mu_p} \right)^n},$$

позволяет определить  $C_0$ , которая для рассматриваемого случая

$$C_0 = \frac{-0,1 - 0,45 \left( \frac{0,2}{0,01} \right)^{0,6}}{1 - \left( \frac{0,2}{0,01} \right)^{0,6}} = 0,56.$$

Теперь, подсчитав по формуле (10.6) погрешности показаний счетчика на рабочей жидкости (эфирном масле), получим, что относительная погрешность показаний счетчика на рабочей жидкости составляет  $+0,46\%$ ;  $+0,49\%$  и  $+0,53\%$  при первом, втором и третьем пропусках соответственно.

Таким образом, по результатам последнего поверочного пропуска счетчик забракован Вами правильно.

## Глава 13. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ

## 13.1. Основные понятия и положения

Под измерением уровня понимается индикация положения раздела двух сред различной плотности относительно какой-либо горизонтальной плоскости, принятой за начало отсчета.

Измерение уровня — довольно распространенный измерительный процесс в нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и других отраслях промышленности. Иногда по результатам измерения уровня судят об объемном количестве вещества, содержащегося в резервуарах (баках, цистернах, танках и т. п.). Для этого используют либо мерные емкости постоянного (по высоте) поперечного сечения (например, мерные баки объемных расходомерных установок), либо специальные тарировочные таблицы, ставящие в соответствие каждому текущему значению уровня значение объема резервуара.

Средства измерений уровня называются уровнемерами. Как и все средства измерений, уровнемеры состоят из совокупности измерительных преобразователей и вспомогательных устройств, необходимых для осуществления процесса измерений (устройств для линеаризации функций преобразования, отсчетных устройств и т. д.).

Первичный преобразователь (датчик) воспринимает измеряемую величину — уровень — и преобразует ее в выходной сигнал (электрический, пневматический, частотный), поступающий на последующие преобразователи, или в показания, отсчитываемые по шкале уровнемера.

Принцип действия первичных преобразователей уровнемеров основан на различии физических свойств веществ, образующих границу раздела.

В зависимости от того, различие каких физических свойств веществ воспринимает первичный преобразователь, уровнемеры подразделяют на механические, акустические, электрические, оптические и тепловые.

Основные метрологические характеристики уровнемеров любых типов следующие:

статическая функция преобразования (градуировочная характеристика), описывающая связь выходных сигналов первичного преобразователя с текущими значениями измеряемой величины — уровня,

основная погрешность:

вариация показаний:

дополнительные погрешности, обусловленные конструктивными особенностями уровнемеров, взаимодействием чувствительного элемента датчика со средами, образующими поверхность раздела.

Указанный комплекс характеристик определяется при градуировке, поверке, аттестации и испытаниях уровнемеров.

Кроме того, для уровнемеров, работающих в системах автоматического управления технологическими процессами, измеряющих быстропеременные значения уровня, необходимо нормировать и оценивать динамические характеристики (постоянную времени, переходную характеристику и т. д.).

К числу методических погрешностей, присущих любым процессам измерения уровня жидкостей, относятся: погрешность ориентации датчика в сосуде и температурная.

Погрешность ( $\Delta_y$ ) из-за неправильной пространственной ориентации датчика возникает вследствие неточностей установки сосуда, монтажа датчика уровнемера на нем, деформации несущих элементов транспортируемых сосудов при их заполнении и опорожнении, неравномерной осадки фундаментов стационарных емкостей — хранилищ и т. д. Все это, в конечном счете, приводит к несовпадению трассы измерения уровня с перпендикуляром к поверхности раздела сред.

На рис. 126 изображен случай, когда сосуд, в котором измеряется уровень жидкости, наклонен относительно горизонтали на угол  $\varphi_1$ .

Погрешность  $\Delta_y$  в этом случае

$$\Delta'_y = l \sin \varphi_1, \quad (13.1)$$

где  $l$  — смещение точки установки датчика на базовой поверхности от оси симметрии сосуда. Очевидно, что при  $l = 0$  (при установке датчика точно по оси симметрии сосуда)  $\Delta'_y = 0$ .

На рис. 126 показан также случай, когда датчик уровнемера смонтирован под углом  $\varphi_2$  к вертикальной оси сосуда. В этом случае погрешность  $\Delta_y$

$$\Delta''_y = (H - h) (\cos \varphi_2 - 1), \quad (13.2)$$

где  $H$  — верхний предел измерений уровнемера,  $h$  — текущее значение уровня.

В наихудшем случае (при „наихудшем” расположении системы датчик—сосуд) обе указанных погрешности ( $\Delta'_y$  и  $\Delta''_y$ ) будут суммироваться.

Методическая температурная погрешность ( $\Delta_t$ ) обуславливается температурными изменениями размеров системы датчик—сосуд. Значение этой погрешности зависит от расположения точки крепления датчика относительно базовой плоскости (от которой ведется отсчет уровня) и построения чувствительного элемента датчика. В зависимости от построения чувствительного элемента датчики уровнемеров подразделяют на зондовые и базовые. Для зондовых датчиков (рис. 127) характерно наличие вытянутого чувствительного элемента („зонда”), глубина погружения которого в жидкость и является мерой ее уровня. При базовых

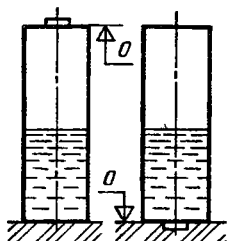
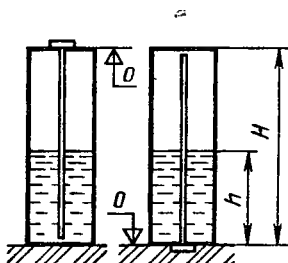
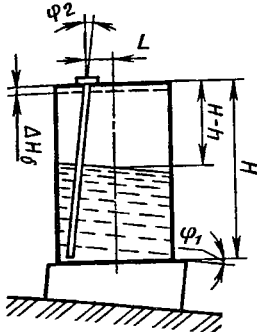


Рис. 126. Иллюстрация случая, когда сосуд, в котором измеряется жидкость, находится в наклонном состоянии

Рис. 127. Зондовый датчик

Рис. 128. Базовый датчик

вых датчиках (рис. 128), например, акустических, уровень измеряется путем фиксации расстояния между поверхностью раздела и излучающей поверхностью датчика.

Температурная погрешность при использовании зондовых датчиков и креплении их на верхней крышке сосуда

$$\Delta'_t = ((H_d - h) \alpha_d - H_c \alpha_c) \Delta t, \quad (13.3)$$

где  $H_d$ ,  $H_c$  — линейные размеры (высота) зонда и сосуда,  $\alpha_d$ ,  $\alpha_c$  — коэффициенты линейного расширения материалов зонда и сосуда,  $\Delta t$  — изменение температуры от характерной для нормальных условий.

При нижнем креплении зондовых датчиков

$$\Delta''_t = -h \cdot \alpha_d \Delta t. \quad (13.4)$$

Методическая температурная погрешность при использовании базовых датчиков определяется теми же формулами (13.3) и (13.4) при условии  $\alpha_d = 0$ . При нижнем креплении базовых датчиков методическая температурная погрешность, как следует из формулы (13.4), отсутствует.

В ряде случаев для того, чтобы создать более благоприятные условия измерений, устранить волнения поверхности жидкости, обеспечить возможность визуального отсчета и т. д., датчики уровнемеров помещают в специальные камеры, сообщающиеся с полостью сосуда, в котором измеряется уровень. В этом случае вследствие гидравлического сопротивления каналов, связывающих камеры с основным сосудом, возникает дополнительная методическая погрешность ( $\Delta_d$ ), обусловленная „отставанием” уровня жидкости в полости камеры. Значение „отставания”, а следовательно, и погрешности  $\Delta_d$  тем больше, чем больше скорость изменения уровня и вязкость контролируемой жидкости.



Значение погрешности  $\Delta_d$  может быть оценено по приближенной формуле

$$\Delta_d \approx \xi \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{d_c^2}{d_k^2}, \quad (13.5)$$

где  $\xi$  — суммарный коэффициент сопротивления соединительного канала (сумма коэффициентов местных сопротивлений и коэффициента гидравлического сопротивления канала),  $v$  — скорость изменения уровня в сосуде,  $d_c, d_k$  — диаметры сосуда и соединительного канала.

### 13.2. Механические уровнемеры

К этим уровнемерам относятся поплавковые, буйковые и гидростатические уровнемеры. Все они реализуют абсолютный метод измерения уровня, основанный на использовании различия плотностей веществ, образующих границу раздела. Принципиальная схема поплавкового уровнемера представлена на рис. 129. В качестве первичного преобразователя уровнемера используется тело (поплавок) обычно шарообразной или цилиндрической формы, плавающее на поверхности жидкости и имеющее постоянную осадку ( $l$ ). Поплавок под действием выталкивающей („Архимедовой“) силы перемещается вместе с уровнем жидкости. Положение поплавка, являющееся мерой текущего значения уровня жидкости, фиксируется вторичным преобразователем и преобразуется в электрический, пневматический, частотный сигнал и (или) отсчитывается по шкале показывающего прибора. Связь поплавка со вторичным преобразователем может осуществляться с помощью механических элементов (троса, ленты, рычага) или с помощью бесконтактных (оптических, акустических, радиоизотопных и др.) следящих систем.

Характерная особенность поплавковых уровнемеров с механической связью — необходимость герметизации вывода при измерении уровня токсичных, легкоиспаряющихся жидкостей, в сосудах с избыточным давлением, а также наличие дополнительных погрешностей, связанных с упругой деформацией и трением элементов связи.

В то же время использование для фиксации положения поплавка бесконтактных следящих систем усложняет конструкцию уровнемеров, обуславливает, как правило, нелинейность их характеристик преобразования.

При тщательной градуировке и правильной эксплуатации поплавковых расходомеров их основная погрешность может быть сведена к значению порядка  $\pm 1$  мм в диапазоне измерений до 15–20 м. Вследствие этого поплавковые уровнемеры находят применение в качестве образцовых.

Наиболее существенное влияние на точность измерения уровня поплавковыми расходомерами оказывает изменение температуры в рабочей полости сосуда. Изменения температуры обуславливают температурную деформацию поплавка, изменения плотностей жидкости и газа в над-

жидкостной полости, что, в конечном счете, приводит к изменению  $\Delta l$  осадки поплавка. Так, если температурные изменения плотностей жидкости ( $\rho_{\text{ж}}$ ) и газа ( $\rho_{\text{г}}$ ) составят соответственно  $\Delta\rho_{\text{ж}}$ ,  $\Delta\rho_{\text{г}}$ , то абсолютная дополнительная погрешность уровнемера, связанная с изменением осадки поплавка

$$\Delta l = \frac{\Delta\rho_{\text{ж}} + \Delta\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}} \cdot l \quad (13.6)$$

при условии постоянства площади сечения поплавка или столь малых значений  $\Delta l$ , при которых эту площадь можно считать постоянной.

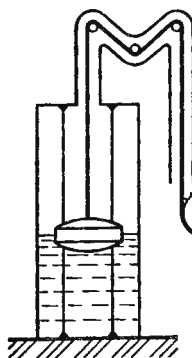


Рис. 129. Принципиальная схема поплавкового уровнемера

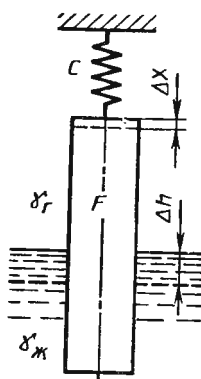


Рис. 130. Принципиальная схема буйкового уровнемера

Принципиальная схема буйкового уровнемера приведена на рис. 130. Чувствительный элемент уровнемера — буй представляет собой массивное тело (как правило, осесимметричное), подвешенное вертикально внутри сосуда, в котором измеряется уровень жидкости. При изменении  $\Delta h$  уровня жидкости меняется степень погружения буя, а следовательно, и действующая на него выталкивающая сила. Изменение выталкивающей силы компенсируется деформацией ( $\Delta x$ ) упругого элемента (пружины, мембраны, торсионной трубки), которая и является мерой изменения уровня жидкости в сосуде.

Деформация упругого элемента вторичным преобразователем преобразуется в пропорциональный электрический, пневматический или частотный сигнал.

Статическая характеристика преобразования буйковых уровнемеров имеет вид

$$\Delta x = \frac{\Delta h}{1 + C/(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) \cdot g \cdot F}, \quad (13.7)$$

где  $C$  — жесткость упругого элемента,  $g$  — ускорение свободного падения,  $F$  — площадь поперечного сечения буя.

Как следует из уравнения (13.7), основными факторами, определяющими точность измерения уровня буйковыми уровнемерами, являются:

непостоянство жесткости  $C$ , обусловленное свойствами упругого элемента:

непостоянство площади  $F$  поперечного сечения буя, характеризующее качество и технологию его изготовления:

изменения плотностей жидкости и газа, обусловленные непостоянством их состава и температуры.

Следует отметить, что температурный фактор влияет и на первые две составляющие погрешности измерения уровня. Основная погрешность буйковых уровнемеров колеблется в пределах  $\pm (1-1,5) \%$ .

Особенность буйковых уровнемеров — наличие начального (неконтролируемого) уровня, от которого ведется отсчет показаний. Размер начального уровня составляет обычно 4–10 мм. Он необходим для устранения влияния сил поверхностного натяжения, которое максимально в момент касания (или отрыва) буя поверхности жидкости. С этой же целью используют специальные покрытия, уменьшающие налипание жидкости на поверхности буя.

Принцип действия гидростатических уровнемеров (рис. 131) основан на измерении давления столба жидкости, высота которого равна высоте уровня жидкости в сосуде. Гидростатическое давление при этом измеряется либо с помощью двух манометров ( $M_1, M_2$ ), либо одним дифференциальным манометром (ДМ).

В первом случае (при измерении разности давлений  $\Delta p = p_1 - p_2$  двумя манометрами) характеристика преобразования уровнемеров описывается уравнением

$$h = \frac{\Delta p}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})} + \frac{L}{1 - \rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{г}}}, \quad (13.8)$$

где  $L$  — разность высот установки газового ( $M_2$ ) и жидкостного ( $M_1$ ) манометров.

Во втором случае (при использовании ДМ) характеристика преобразования имеет вид

$$h = \frac{\Delta p}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}. \quad (13.9)$$

Как следует из формул (13.8) и (13.9), погрешности гидростатических уровнемеров складываются из погрешностей манометрических датчиков, а также температурных погрешностей, обусловленных изменением плотностей жидкости и парогазовой смеси, а также изменением линейных размеров системы сосуд–датчик.

Гидростатические уровнемеры с механическими воспринимающими элементами отличаются простотой монтажа и обслуживания, высокой надежностью. Однако их чувствительный элемент находится в непосредст-

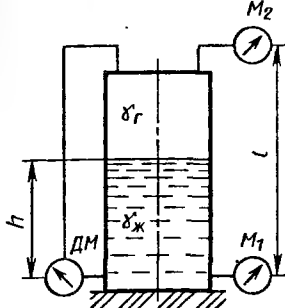


Рис. 131. Принцип действия гидростатических уровнемеров

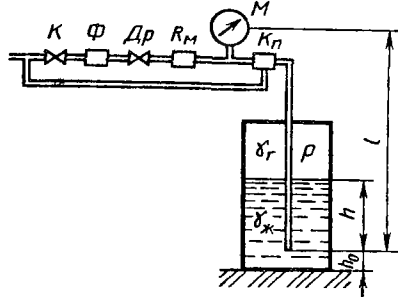


Рис. 132. Принципиальная схема пьезометрического уровнемера

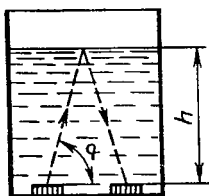
венном контакте с контролируемой средой, что требует в ряде случаев применения для датчиков специальных материалов, существенно сужает область их использования. От указанного недостатка свободен один из типов гидростатических уровнемеров — **пьезометрический**, принципиальная схема которого приведена на рис. 132. Прибор работает следующим образом. Нейтральный (по отношению к находящейся в сосуде жидкости) газ при открытом отсечном клапане  $K$  проходит через фильтр  $\Phi$ , дросселируется до определенного заданного давления дросселем  $Др$  и пропускается через импульсную трубку, опущенную в жидкость, уровень которой измеряется. Регулятор расхода  $R$  обеспечивает постоянный расход газа  $q$ , не зависящий от текущего значения уровня  $h$ . Мерой  $h$  в данном случае является регистрируемое манометром  $M$  давление.

Пьезометрические уровнемеры пригодны для измерения уровня любых, в том числе, и агрессивных жидкостей (при правильном выборе материала импульсной трубки). Единственный лимитирующий фактор — вязкость жидкости. Влияние вязкости проявляется в увеличении диаметра пузырьков газа, отрыв которых от обреза трубки сопровождается возникновением колебаний давления и расхода в измерительной линии, что резко снижает точность измерений. Поэтому пьезометрические уровнемеры применяют для измерения уровня жидкостей, вязкость которых не превышает 2000 сСт.

### 13.3. Акустические уровнемеры

Существуют и находят применение акустические уровнемеры трех основных типов — локационные уровнемеры, уровнемеры поглощения и резонансные. Все они реализуют различные физические явления, связанные с распространением звука в упругой (жидкостной или газовой) среде.

Так, локационные уровнемеры (рис. 133) реализуют эффект отражения звуковой волны от поверхности раздела сред. Генератор  $G$  излучает в жидкость пачку импульсов высокой (ультразвуковой) частоты. Отраженный от границы раздела жидкость—газ сигнал улавливается приемником  $П$  ультразвуковых колебаний. Время  $t$  между моментом посылки зондирующего импульса и моментом прихода отраженного от уровня импульса связано с текущим значением уровня зависимостью



$$t = \frac{2h}{c \cdot \sin \alpha}, \quad (13.10)$$

Рис. 133. Локационный уровнемер

где  $c$  — скорость звука в контролируемой среде.

Время  $t$  фиксируется соответствующей измерительной схемой и преобразуется в выходной сигнал уровнемера, пропорциональный (при постоянном и известном значении  $c$ ) текущему значению уровня  $h$ .

Локация уровня может производиться снизу (как показано на рис. 133) и сверху. Во втором случае по времени прохождения ультразвуковых колебаний через газ определяется толщина газовой подушки. Локация снизу предпочтительней, так как при этом требуется меньшая мощность излучателя и меньшее усиление сигнала в приемной части уровнемера.

Большинство локационных уровнемеров имеет одноэлементные датчики, у которых функции излучателя и приемника попеременно выполняет один и тот же элемент (при этом  $\alpha$  в формуле (13.10) равно  $\pi/2$  и  $\sin \alpha = 1$ ).

Иногда, например, при измерении уровня агрессивных жидкостей или недопустимости нарушения целостности сосуда, датчик помещается в специальном кармане вне сосуда, и излучение зондирующего и прием отраженного сигналов производится через стенку дна сосуда. В этом случае карман заполняется веществом с акустическим сопротивлением, близким к сопротивлению контролируемой среды, а частота зондирующего сигнала выбирается такой, при которой влияние стенки сосуда на показания уровнемеров было бы минимальным. Обычно диапазон рабочих частот составляет 20–100 кГц при зондировании через газ и 0,1–2 МГц при зондировании через жидкость.

Одно из основных условий нормального функционирования локационных уровнемеров — определенное взаимное положение источника — приемника ультразвуковых колебаний и отражающей поверхности — уровня. Волнение поверхности жидкости в сосуде, наклон сосуда или датчика-излучателя могут привести к тому, что отраженный сигнал либо вообще не попадет на приемник, либо попадет настолько ослабленным, что не вызовет срабатывания системы измерения времени. В подобных условиях приходится применять специальные меры — размещать датчик в усложненной камере, использовать звуководные трубы и т. п.

Недостаток локационных уровнемеров — их повышенная чувствительность к включениям в жидкости (микровзвесей, пузырьков газа). Этот недостаток отсутствует у двухканальных уровнемеров, работающих по схеме совпадений. В этом случае излучение ультразвуковых колебаний осуществляется одновременно двумя датчиками. Отраженные сигналы усиливаются и суммируются, срабатывание системы измерения времени происходит только от суммарного сигнала. Если же из-за наличия включений в зоне работы какого-либо датчика один из отраженных сигналов опережает другой, система измерения времени не срабатывает и, тем самым, исключается возможность ошибочного измерения уровня. Другой способ устранения влияния неоднородности жидкости и деформации уровня — использование звуководов. В этом случае локация уровня производится сверху, но не через газ, а через специальный жидкостной или металлический звуковод. В точке встречи звуковода с жидкостью происходит отражение сигнала, по времени прихода которого к приемнику и определяется положение уровня жидкости. Такие уровнемеры (со звуководами) обладают сравнительно невысокой точностью (порядка  $\pm 3\%$ ), но зато значительно расширяются их эксплуатационные возможности. В частности, они могут использоваться для измерения уровня низкокипящих жидкостей, при высоких температурах контролируемых веществ.

Основными факторами (кроме погрешностей измерительной схемы), влияющими на точность локационных уровнемеров, являются тепловое расширение сосуда и изменение скорости звука в среде. Влияние последнего фактора особенно существенно при локации через газ, так как скорость звука в газе зависит от его температуры, давления, влажности. Обычно скорость звука в рабочей среде определяется экспериментально в процессе градуировки уровнемера. Для этого на точно измеренном расстоянии  $l$  от излучателя — приемника — устанавливают специальный отражатель, а измерительную схему дополняют переключающим устройством, позволяющим индицировать отраженный от него сигнал. Скорость звука определяется как  $c = 2l/\tau$ , где  $\tau$  — время прохождения сигнала от излучателя до отражателя и обратно на приемник.

Аналогичный принцип используется и в уровнемерах с автоматической компенсацией изменения скорости распространения звука. В этих уровнемерах наряду с основным каналом для измерения уровня имеется дополнительный компенсационный канал строго фиксированной длины  $l$  и постоянно заполненный веществом, через которое ведется локация уровня. Измерительная схема сравнивает время прохождения звуком основного ( $t$ ) и компенсационного ( $\tau$ ) каналов и выдает сигнал, пропорциональный текущему значению уровня  $h = l \cdot t/\tau$ .

Использование компенсационных схем позволяет существенно (до  $\pm 0,1\%$ ) уменьшить погрешность локационных уровнемеров.

Принцип действия диссипативных ультразвуковых уровнемеров основан на явлении рассеивания (поглощения) звуковой энергии в веществе. В простейшем случае диссипативный уровнемер (рис. 134) состоит из излучателя  $I$  и приемника  $П$ , установленных на дне и крышке сосуда.

Выходной сигнал  $U$  уровнемера, пропорциональный отношению интенсивностей излучаемой и регистрируемой звуковых волн, связан с текущим значением уровня зависимостью

$$U = e^{-2h(\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad (13.11)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты затухания амплитуды звуковой волны в жидкости и газе соответственно.

Нелинейность функции преобразования (градуировочной характеристики), а также низкий КПД, обусловленный отражением звуковой энергии от границы раздела жидкость—газ (например, интенсивность преломленной ультразвуковой волны при прохождении через границу вода—воздух составляет всего 0,001 падающей), препятствует промышленному освоению диссипативных уровнемеров.

Принцип действия резонансных уровнемеров заключается в возбуждении колебаний столба газа над уровнем жидкости и в фиксации резонансной частоты, при которой наблюдается возникновение стоячей волны.

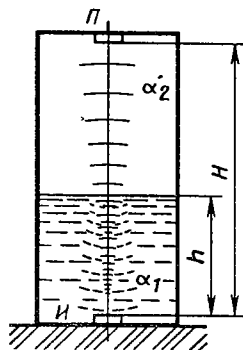


Рис. 134. Диссипативный ультразвуковой уровнемер

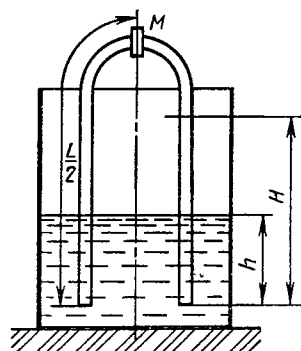


Рис. 135. Датчик резонансного уровнемера

нансной частоты, при которой наблюдается возникновение стоячей волны. Датчик уровнемера (рис. 135) представляет собой трубчатый резонатор достаточной для образования стоячей волны длины  $L$  ( $L$  должно быть не менее трех диаметров резонатора и обеспечивать требуемый диапазон измерения уровня  $H$ ). Для возбуждения колебаний резонатора используются магнито-электрические преобразователи  $M$  — обычно ленточные микрофоны.

Статическая характеристика преобразования резонансных уровнемеров описывается формулой

$$\nu = \frac{c}{2(L-2h)}, \quad (13.12)$$

где  $\nu$  — резонансная частота, фиксируемая измерительной схемой уровнемера.

Основными недостатками резонансных уровнемеров — сложность и громоздкость конструкции (особенно при больших диапазонах измерений уровня), а также существенное влияние на их показания изменений скорости с распространения звука в газовой среде.

### 13.4. Электрические уровнемеры

Принцип действия электрических уровнемеров основан на различии электрических свойств жидкостей и газов. При этом жидкости, уровень которых измеряется, могут быть как проводниками, так и диэлектриками; газы же, находящиеся в жидкостном пространстве, всегда диэлектрики. Основным параметром, определяющим электрические свойства проводников, является их электропроводность, а диэлектриков — относительная диэлектрическая проницаемость, показывающая, во сколько раз по сравнению с вакуумом уменьшается в данном веществе сила взаимодействия между электрическими зарядами.

В зависимости от того, какой выходной параметр (сопротивление, емкость или индуктивность) первичного преобразователя „реагирует” на изменение уровня, электрические уровнемеры подразделяются на кондуктометрические, емкостные и индуктивные.

**Кондуктометрические уровнемеры** (уровнемеры сопротивления) применяются для измерения уровня проводящих жидкостей (в том числе, и жидких металлов). Первичный преобразователь (рис. 136) кондуктометрического уровнемера представляет собой два электрода, глубина погружения которых в жидкость и определяет текущее значение ее уровня. Выходным параметром преобразователя является его сопротивление или проводимость. При измерении уровня „сверхпроводящих” жидкостей (например, жидких металлов) возможно применение кондуктометрических уровнемеров с одним электродом, роль второго электрода при этом выполняет заземленный сосуд.

Основные факторы, ограничивающие точность кондуктометрических уровнемеров — непостоянство площадей поперечных сечений электродов (и вследствие этого непостоянство удельных сопротивлений по длине электродов), а также образование на электродах пленки (окисла, соли) с высоким удельным сопротивлением, что приводит к резкому неконтролируемому снижению чувствительности датчика.

Кроме того, на точность кондуктометрических уровнемеров существенное влияние оказывает изменение электропроводности рабочей жидкости, поляризация среды вблизи электродов.

Вследствие этого погрешности кондуктометрических методов измерения уровня (даже при использовании различных компенсационных схем) достаточно высоки (5—10 %), поэтому они находят преимущественное применение в качестве сигнализаторов уровня проводящих жидкостей.

Первичный преобразователь (рис. 137) емкостного уровнемера представляет собой коаксиальный цилиндрический конденсатор, внутренней обкладкой которого служит металлический зонд 1, покрытый



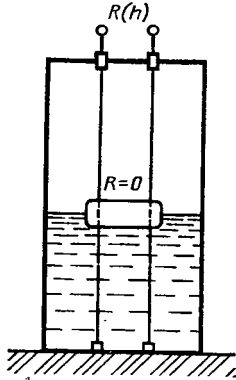


Рис. 136. Первичный преобразователь кондуктометрического уровнемера

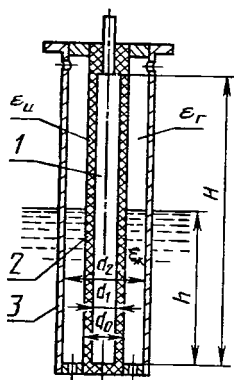


Рис. 137. Первичный преобразователь емкостного уровнемера

изоляцией 2. Зонд расположен по оси металлической трубы 3, являющейся наружной обкладкой датчика-конденсатора. Зазор между внешней поверхностью изоляции зонда и наружной обкладкой называется рабочим зазором, сообщаемым через отверстия в нижней центrovочной втулке и в наружной трубе с сосудом, в котором измеряется уровень. Жидкость, попадая через эти отверстия в рабочий зазор датчика, изменяет его кажущуюся емкость. Измерительная схема (вторичный преобразователь) регистрирует разность кажущихся емкостей датчика при текущем и нулевом значениях уровня.

Вследствие простоты, удобства монтажа и обслуживания, надежности и потенциально высокой точности (известны емкостные уровнемеры, основная погрешность которых не превосходит 0,1–0,2 %) емкостные уровнемеры находят широкое применение в промышленности.

К недостаткам емкостных уровнемеров относятся: высокая чувствительность к изменению электрических свойств жидкостей, обусловленных изменением их состава, температуры и т. п., образование на элементах датчика электропроводящей или непроводящей пленки вследствие химической активности жидкости, конденсации ее паров, налипания самой жидкости на контактирующие в ней элементы и т. п.

Оба указанных недостатка обуславливают появление существенных дополнительных погрешностей. С первым из них борются, применяя различные компенсационные схемы; второй устраняют, используя адгезионные покрытия элементов датчика, вводя специальные присадки в жидкость, применяя „снос” образующейся пленки и т. д.

Первичный преобразователь индуктивных уровнемеров представляет собой катушку индуктивности. Проводящая жидкость при этом играет либо роль шунта, изменяющего число витков катушки, либо роль экранана, влияющего на коэффициент самоиндукции катушки. В первом слу-

чае используются катушки с обнаженными витками. При перемещении уровня жидкости, обладающей высокой электропроводностью, часть витков шунтируется и соответствующим образом меняет индуктивность катушки первичного преобразователя — датчика.

Экранирующий эффект проводящей жидкости заключается в возникновении в ней вихревых токов (токов Фуко), электромагнитное поле которых оказывает размагничивающее действие на поле измерительной катушки. При этом датчик выполняется в виде катушки, помещенной в защитный чехол (рис. 138). Чехол исключает контакт катушки с контролируемой жидкостью, обеспечивает возможность проведения монтажно-демонтажных работ без нарушения герметичности сосуда (что особенно важно, например, при измерении уровня жидких теплоносителей в ядерных реакторах). Однако при этом (особенно при больших толщинах чехла и малой электропроводности жидкости) резко уменьшается уровень полезного сигнала.

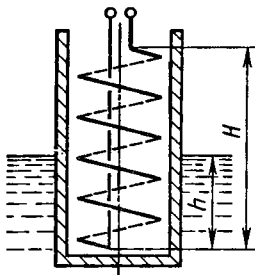


Рис. 138. Датчик в виде катушки

Наиболее существенное влияние на показания (и на погрешность) индуктивных уровнемеров оказывают изменения электропроводности жидкости и чехла вследствие старения материала, образования пленок и т. п.

Основная же погрешность индуктивных уровнемеров, обусловленная погрешностями его градуировки и измерительной схемы, может быть „уложена” в  $\pm 0,5\%$ .

### 13.5. Оптические уровнемеры

При измерении уровня жидкостей оптическими методами могут быть использованы различные явления, связанные с прохождением света через среды, образующие поверхность раздела, — отражение или преломление света на поверхности раздела, ослабление его интенсивности в поглощающей среде и др. Однако на практике наибольшее распространение получили оптические уровнемеры с визуальной фиксацией границы раздела жидкость—газ и фотоэлектрические уровнемеры, использующие эффект отражения света от поверхности жидкости.

Визуальные уровнемеры представляют собой прозрачные вставки в стенках сосуда или в сообщающихся с сосудом мерных трубках с нанесенной на них шкалой.

Визуальные уровнемеры — самые простые и в то же время самые точные средства измерения уровня.

При соответствующем (исключающем влияние мениска) диаметре мерной трубки, подсветке поверхности раздела и использовании специальных средств отсчета (например, катетометров) погрешность визуальных уровнемеров при неподвижной поверхности жидкости может быть

сведена к десятым и даже сотым долям миллиметра. Вследствие этого они находят широкое применение в поверочных установках с мерными баками, образцовых мерниках. Сложность дистанционных измерений уровня, невозможность использования в системах регулирования автоматизированными технологическими процессами препятствуют широкому промышленному применению визуальных уровнемеров.

Принципиальная схема фотометрического уровнемера отражения приведена на рис. 139. Световой луч от лампы  $L$  проходит через конденса-

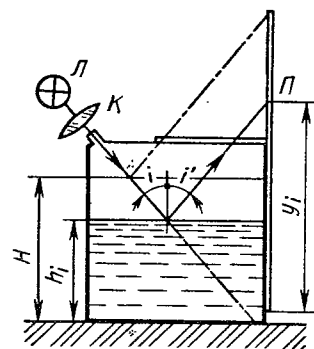


Рис. 139. Принципиальная схема фотометрического уровнемера

(уменьшения) этих влияний используют лазерные источники света, волоконные световоды и различные компенсационные схемы.

### 13.6. Тепловые уровнемеры

Тепловые уровнемеры основаны либо на использовании различия температур жидкости и парогазовой смеси над ней (дилатометрические уровнемеры), либо различия их теплопроводностей (терморезисторные уровнемеры и уровнемеры ТЭДС).

Чувствительным элементом дилатометрического уровнемера (рис. 140) является стержень или трубка, омываемые жидкостью и парогазовой смесью. В результате теплообмена между чувствительным элементом, жидкостью и газом чувствительный элемент приобретает определенную температуру, пропорциональную температурам жидкости и газа, а также текущему значению уровня жидкости в сосуде. Следовательно, при постоянстве температур жидкости и газа средняя температура чувствительного элемента будет являться мерой текущего значения уровня. О средней температуре чувствительного элемента судят либо по его относительному удлинению, либо по давлению жидкости или газа, заполняющим его внутреннюю полость (см. рис. 142).

Дилатометрические уровнемеры применяют при измерении уровня конденсированных жидкостей, т. е. когда температуры жидкости и паро-

саторную линзу  $K$  и через окно вводится в сосуд. Падая под углом  $\alpha$  на поверхность жидкости, свет отражается от нее и попадает через оптически прозрачную стенку на протяженный приемник излучения  $\Pi$ . Координата приемника  $y$ , в которой фиксируется максимальная освещенность, характеризует текущее значение уровня.

Аналогичным образом может быть построен и фотоэлектрический уровнемер преломления.

Наиболее существенное влияние на погрешность оптических уровнемеров оказывает состояние поверхности жидкости. Возмущения поверхности, появление на ней пены, крен сосуда искажают результаты измерения уровня. Для устранения

газовой смеси над ней относительно стабильны и при этом значительно разнятся между собой.

Несмотря на простоту и надежность дилатометрические уровнемеры вследствие малых диапазонов измерений (не более 0,75 м) и невысокой точности не получили широкого промышленного применения.

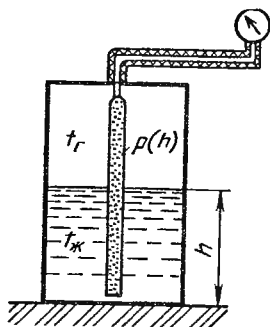


Рис. 140. Чувствительный элемент дилатометрического уровнемера

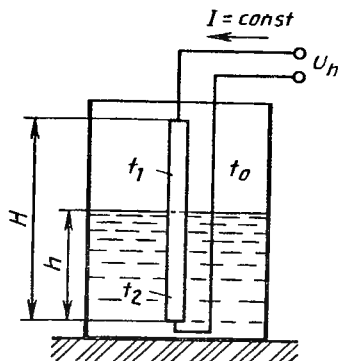


Рис. 141. Чувствительный элемент тензорезисторных уровнемеров

Чувствительный элемент тензорезисторных уровнемеров (рис. 141) представляет собой помещенный в сосуд резистор, электрическое сопротивление которого определяется его температурой. Для создания градиентов температур в жидкой и газовой фазах применяют прямой и косвенный подогревы резистора. Прямой подогрев осуществляется за счет тепла, выделяемого при прохождении через резистор электрического тока, косвенный — с помощью монтируемого в датчике подогревательного элемента.

Вследствие различной интенсивности теплопередачи от нагретого тела к жидкости и газу, участки резистора, находящиеся в соприкосновении с различными фазами, будут иметь различную температуру и, следовательно, различное электрическое сопротивление. По сопротивлению резистора в данном случае можно судить о текущем значении уровня, т. е. выходным параметром датчика является сопротивление резистора или, что при условии постоянства силы тока  $I = \text{const}$ , эквивалентно падению напряжения  $U_n$  на резисторе.

Обычно чувствительный элемент тензорезисторных уровнемеров представляет собой вертикально натянутую тонкую проволоку с большим погонным электрическим сопротивлением, что обеспечивает его высокую чувствительность.

Функция преобразования датчика линейна и описывается уравнением

$$\Delta R = r_0 \alpha_t (t_2 - t_1) \cdot h, \quad (13.13)$$

где  $\Delta R = R_n - R_0$  — разность сопротивлений резистора при текущем ( $R_n$ ) и нулевом ( $R_0$ ) уровнях жидкости,  $r_0$  — погонное сопротивление

резистора при нормальной температуре ( $t_0$ ),  $\alpha_t$  — температурный коэффициент сопротивления материала резистора,  $t_2$ ,  $t_1$  — температуры погруженного в жидкость и „сухого” участков резистора.

Как следует из формулы (13.13), основными источниками дополнительных погрешностей терморезисторных уровнемеров являются непостоянство коэффициента  $\alpha_t$  и удельного сопротивления  $r_0$ . Стабильность коэффициента  $\alpha_t$  обеспечивается соответствующей обработкой материала резистора, предотвращающей его старение в процессе эксплуатации. Для того, чтобы исключить разрушение поверхности резистора, на нее наносят специальное защитное покрытие. В какой-то мере это стабилизирует величину  $r_0$ . Но наибольшее влияние на  $r_0$  оказывают изменения  $\Delta t_0$  температуры окружающей среды  $t_0$ . Эти изменения обуславливают „плавание” нуля прибора и, как следствие, приводят к дополнительной погрешности

$$\delta_{t_0} = \frac{\Delta t_0}{t_2 - t_1}. \quad (13.14)$$

Для уменьшения этой погрешности применяют различные компенсационные схемы с дополнительными резисторами.

В настоящее время в качестве датчиков терморезисторных уровнемеров широко используют полупроводниковые резисторы (ПТР), преимущество которых заключается в большом температурном коэффициенте сопротивления и в высоком электрическом сопротивлении, что обеспечивает высокую чувствительность датчиков. Практически все серийно выпускаемые терморезисторные уровнемеры (типов КМТ, ММТ и др.) имеют полупроводниковые датчики. Единственный (но в ряде случаев немаловажный) недостаток ПТР — нелинейность их выходной характеристики.

Специфической областью применения терморезисторных уровнемеров является криогеника (измерение уровня жидких газов). При этом все большее распространение получают резисторы, изготовленные из сверхпроводящих материалов. Вследствие эффекта сверхпроводимости погруженная часть резистора имеет нулевое сопротивление и выходной сигнал зависит лишь от уровня сжиженного (при температуре меньшей 20 К) газа и температуры „сухой” (непогруженной) части резистора.

### 13.7. Образцовые уровнемерные установки

Принцип действия образцовых уровнемерных установок основан на точном воспроизведении ряда дискретных значений уровня. При этом воспроизведение требуемых значений уровня может осуществляться как за счет непосредственного заполнения мерных сосудов установки жидкостью, так и путем имитации изменения уровня вертикальным перемещением заполненной жидкостью емкости.

Принципиальная схема установки, реализующей первый способ воспроизведения уровня, приведена на рис. 142. Установка состоит из следующих основных узлов и элементов:



ура 9 через емкость-успокоитель 15 в измерительные трубы 1, 3, 5. Поднимаясь, жидкость доходит до первой предварительной отметки, на уровне которой установлен датчик ЭПУ 16. При срабатывании ЭПУ закрывается клапан 14 и открывается клапан 13 с меньшим проходным сечением. Подъем жидкости замедляется, и ее уровень плавно подводится к контрольной точке „0”. При этом срабатывает измерительный (фиксирующий точное положение уровня) датчик ЭПУ, включается система индикации уровня на пульте управления, автоматически закрывается клапан 13 и прекращается подача жидкости насосом. Аналогичные операции осуществляются на всех контрольных точках при прямом (повышение уровня до верхнего предела измерений) и обратном (понижение уровня) ходах установки.

В настоящее время создан ряд установок (УМПВ-1А, УМПВ-1, УУО-Н-1, УУО-Н-2,5, УУО-Н-6, УУО-Н-12), реализующих описанный способ воспроизведения и измерения уровня жидкостей, на диапазоны измерений 0—1, 0—2,5, 0—6 и 0—12 м. Погрешность воспроизведения и фиксации значений (на контрольных точках) уровня на этих установках не превышает 1 мм.

Установки с непосредственным заполнением мерных сосудов пригодны для поверки и градуировки уровнемеров любых (нашедших применение на сегодняшний день) типов, любых конструктивных разновидностей.

В отличие от них установки с имитацией изменения уровня пригодны лишь для метрологического обслуживания поплавковых уровнемеров с гибкой механической связью между первичным и вторичным измерительными преобразователями, ультразвуковых уровнемеров с локацией уровня через газовую среду, следящих радиоизотопных уровнемеров.

Принципиальная схема уровнемерной установки с имитацией изменения уровня приведена на рис. 143. Установка состоит из двух систем: „имитирующей” и измерительной. „Имитирующая” система представляет собой платформу 8, перемещаемую по направляющим 4 с помощью лебедки 9 и тросов 3. На платформе установлен заполненный жидкостью сосуд (уровнемерная емкость) 5, в стенки которого вмонтированы прозрачные вставки 6, и сервомеханизм 7 для медленного, плавного перемещения сосуда к контрольным точкам.

Измерительная система включает в себя источник света 10, закрепленный на уровнемерной емкости, и фотоэлементы 11, установленные на контрольных отметках в прорезях ленты 13.

Для остановки лебедки и включения механизма плавной подачи уровнемерной емкости к контрольным точкам используются микропереключатели 12. Управление работой установки осуществляется с пульта 14.

Установка работает следующим образом. Поверяемый (градуируемый) уровнемер 1 устанавливается на площадке 2, а его первичный измерительный преобразователь размещается в уровнемерной емкости. По команде с пульта управления включается лебедка, и платформа с уровнемерной емкостью быстро перемещается вверх. При подходе к контрольной точке (примерно на расстоянии 50 мм от нее) срабатывает микро-

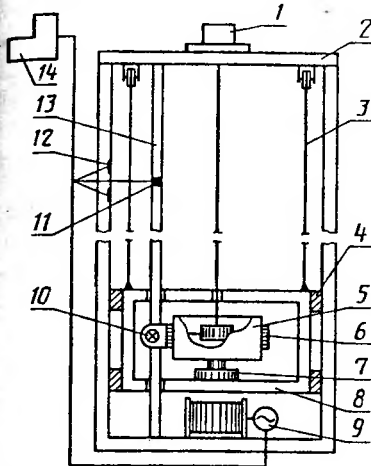


Рис. 143. Принципиальная схема уровнемерной установки с имитацией изменения уровня

переключатель. Отключается ледбедка, платформа останавливается, и сервомеханизм плавно подводит уровнемерную емкость к контрольной точке. Фиксация контрольной точки осуществляется в тот момент, когда луч от источника света попадает на фотозлемент. Уровнемерная емкость останавливается, и на пульте управления включается индикация уровня, соответствующая данной контрольной точке. Аналогичная операция повторяется на всех контрольных точках при прямом и обратном ходах уровнемерной емкости.

В настоящее время создан ряд образцовых уровнемерных установок (УМПВ-2, УУО-Н-2,5, УУО-И-14) с имитацией изменения уровня на диапазоны измерений 0—2,5 и 0—14 м. Погрешность воспроизведения и фиксации уровня на этих установках не превышает 1 мм.

### 13.8. Принципы метрологической аттестации образцовых уровнемерных установок

Общим принципом метрологической аттестации образцовых уровнемерных установок является поэлементное оценивание частных составляющих погрешности установок и статистическое суммирование этих составляющих. При этом различают погрешности воспроизведения уровня (погрешности, обусловленные характером работы гидравлической системы) и погрешности измерения уровня (погрешности, вносимые измерительной системой).

К основным факторам, обуславливающим погрешности воспроизведения уровня на установках, относятся волнения свободной поверхности жидкости при подаче ее к контрольным отметкам, колебания температуры жидкости и окружающей среды.

Волнения поверхности жидкости, связанные с гидравлическим трением при движении ее в измерительных трубах (уровнемерных емкостях), вибрацией насосных систем, имеют случайный характер, поэтому вносимые ими погрешности могут быть оценены совместно с собственными случайными погрешностями измерительных преобразователей пу-



тем обработки результатов многократных наблюдений уровня на контрольных отметках. Аналогично, с помощью специальных высокоточных отсчетных устройств (например, катетометров, отсчетных микроскопов) оцениваются и систематические погрешности измерения (фиксации) уровня на контрольных отметках.

Влияние температуры жидкости и окружающей среды сказывается, в основном, на изменении линейных размеров уровнемерных емкостей (объемное расширение самой жидкости пренебрежимо мало). Относительная температурная погрешность ( $\delta_t$ ) при этом может быть оценена как

$$\delta_t = \frac{3\alpha}{1 + 2\alpha\Delta t} \cdot \Delta t, \quad (13.15)$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала емкости.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ерюхин А.В. Измерение вакуума. — М.: Изд-во стандартов, 1967 — 305 с.
2. Боровков В.М., Атанов Ю.А., Золотых Е.В. и др. Исследования в области высоких давлений. Под ред. Е.В. Золотых. — М.: Изд-во стандартов, 1987 — 304 с.
3. Богдатыев Е.Е., Колтаков В.К., Федяков Е.М. Измерение переменных давлений. — М.: Изд-во стандартов, 1984 — 216 с.
4. Бирюков Б.В., Данилов М.А., Кивилис С.С. Точные измерения расхода жидкостей. — М.: Машиностроение, 1977 — 186 с.
5. Кремлевский П.П. Расходомеры. — М.: Л.: Машиностроение, 1963 — 630 с.
6. Павловский А.Н. Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара. — М.: Стандартгиз, 1967 — 416 с.
7. Цейтлин В.Г. Расходоизмерительная техника. — М.: Изд-во стандартов, 1977 — 239 с.
8. Бобровников Г.Н., Катков А.Г. Методы измерения уровня. — М.: Машиностроение, 1977 — 206 с.

**Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г.** Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие для техникумов. — М.: Издательство стандартов, 1990. 287 с., ил.

В учебном пособии приведены сведения, необходимые для правильного выбора в зависимости от конкретных измерительных задач современных средств измерений давления, расхода, количества и уровня жидкостей, газов и паров и их метрологического обслуживания. Рассказано о тенденциях и перспективах развития техники измерения этих величин и систем.

Учебное пособие предназначено для учащихся средних специальных учебных заведений по специальности „Электротеплотехнические измерения”.

Табл. 10. Ил. 143. Библиогр.: 8 назв.

Рецензенты: канд. техн. наук В.С. Черепанов, В.Д. Малиновская

Х — 2103000000 — 005 — КБ 15—77—90  
085 (02) — 90